

# 2 Prüfstandstypen

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Prüfstandskonfigurationen vorgestellt, die bei der Entwicklung moderner Antriebsstränge im Automobilbau zum Einsatz kommen. Zuerst wird der Verbrennungsmotorprüfstand diskutiert, da der Verbrennungsmotor immer noch das wichtigste Antriebsaggregat darstellt und seine Weiterentwicklung einen wesentlichen Anteil am Entwicklungsaufwand heutiger Fahrzeuge ausmacht.

Anschließend werden Prüfstände beschrieben, die für den Test unterschiedlicher Einzelkomponenten in einem Antriebsstrang eingesetzt werden. Diese Prüfstände liefern auch wertvolle Daten für die Validierung sowie die Bedatung von Simulationsmodellen dieser Einzelkomponenten.

Ein immer größerer Anteil des Entwicklungsbudgets moderner Fahrzeuge wird in die Forschung & Entwicklung der Vielzahl von Steuergeräten investiert. Diese Steuergeräte leisten einen umfassenden Beitrag, unsere Fahrzeuge umweltfreundlicher, komfortabler und sicherer zu gestalten. Die entsprechenden Verifikations- und Validierungsprüfstände werden im Abschnitt über Steuergeräteprüfstände vorgestellt.

Danach folgt die Beschreibung von Prüfständen, auf denen die Gesamtfunktion nach der Integration mehrerer Komponenten zu einem Gesamtsystem validiert werden kann. Dies erfolgt entweder auf Antriebsstrangprüfständen oder Fahrzeugtestsystemen auf der Rolle. Der letzte Teil des ersten Kapitels diskutiert Prüfstände für spezielle Anwendungen wie Rennsport oder Abgaszertifizierung.

## 2.1 Verbrennungsmotorenprüfstände

### 2.1.1 Anwendungsgebiete

In Abhängigkeit von der Zielsetzung des Einsatzes werden Prüfstände für Verbrennungsmotoren grundsätzlich nach folgenden Bereichen und Anwendungstypen unterschieden:

- Forschung:
  - Einzylindermotorenprüfstand
  - Strömungsprüfstand (siehe auch Kapitel 3.3.15)
- Entwicklung:
  - Leistungsprüfstand
  - Funktionsprüfstand
  - Dauerlaufprüfstand
  - Kalibrierprüfstand
  - Abgaszertifizierungsprüfstand

- Produktion:
  - Bandende-Einlaufprüfstand
  - Prüfstand zur Qualitätskontrolle

**Einzylindermotorenprüfstände** dienen vorwiegend Forschungszwecken, um den Verbrennungsprozess auch mit optischen Methoden beurteilen zu können. In **Strömungsprüfständen** kann die Ladungsbewegung untersucht werden, die die Verbrennung ebenfalls wesentlich beeinflusst. Für weitere Details wird auf das Kapitel 2.1.5 verwiesen.

Am **Leistungsprüfstand** wird die vom Prüfling abgegebene Motorleistung  $P$  über dem gesamten Arbeitsbereich unter für den geplanten Prüflingseinsatz repräsentativen Prüfbedingungen mittels aufgenommener Motordrehzahl  $\omega$  (siehe auch Kapitel 3.3.7) und gemessenem Motordrehmoment  $M_d$  (siehe auch Kapitel 3.3.6) bestimmt. Unter Motordrehmoment  $M_d$  versteht man das vom Verbrennungsmotor an der Antriebswelle effektiv abgegebene Moment.

$$P = M_d * \omega$$

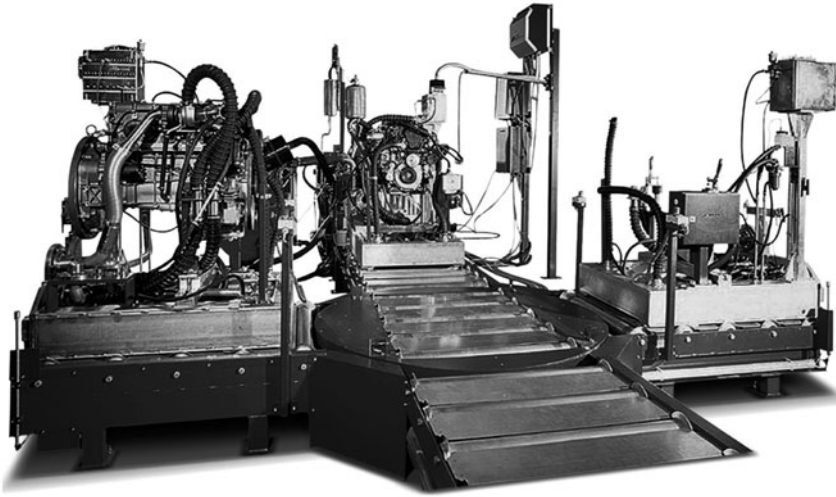
**Gleichung 2-1** Leistung

Der **Funktionsprüfstand** dient zur Optimierung, dem Nachweis und der Absicherung motorbezogener Gesamtsystemfunktionen. Ergänzend zur Motorleistung werden z. B. der Kraftstoffverbrauch (siehe Kapitel 3.3.8), das Verhalten der Motorabgase (siehe Kapitel 3.3.11 und 3.3.14) nach dem Abgassammelkrümmer und nach Abgasnachbehandlung (wenn vorhanden) betrachtet. Eine weitere wichtige Untersuchung ist auch das Ansprechverhalten des Prüflings auf Lastzustandsänderungen.

Zur Untersuchung und Sicherstellung der Haltbarkeit und Langzeitstabilität des Verbrennungsmotors und dessen in der Serie geplanten Komponenten wird der Motor an einem **Dauerlaufprüfstand** einer eingehenden Prüfprozedur unterzogen. Solche Prüfungen können über mehrere hundert Betriebsstunden andauern und benötigen daher auch verlässliche Überwachungssysteme, um den automatischen unbemannten Betrieb des Prüfstandes sicherzustellen.

Zur Aufprägung eines spezifischen und optimalen Motorverhaltens an Motorsteuergeregäten, wie z. B. der Abgaswerte am Motoraustritt unter einer konkret definierten Abfolge von Betriebspunkten, werden in der Serienentwicklung spezifisch konzipierte **Kalibrierprüfstände** eingesetzt. Die Einstellung von variablen Parametern am Einspritzsystem (z. B. Dieselmotor: Einspritzmenge(n), Zeitpunkt, Druck) seien hier beispielhaft erwähnt.

Verbrennungsmotoren, die ihren Einsatz in Nutzfahrzeugen (Lastkraftwagen, Bussen etc.) und in Fahrzeugen bzw. Antrieben für Off-Highway-Anwendungen (Baumaschinen, land- oder forstwirtschaftliche Maschinen, stationäre Dieselfgeneratoren) finden, werden hinsichtlich der Erfüllung vorgegebener Abgasgrenzwerte auf dem **Abgaszertifizierungsmotorprüfstand** (siehe Kapitel 2.7) einem finalen Homologationstest unterzogen. Im Gegensatz dazu erfolgt im Falle von Personenkraftwagen (bzw. von zwei- und dreirädrigen Fahrzeugen bis max. 3500 kg Gesamtfahrzeuggewicht) die Abgasuntersuchung auf einem Rollenprüfstand (siehe Kapitel 2.5).



**Abb. 2-1** Produktionsmotorprüfstand mit Palettentransportsystem

Ein integrales und unverzichtbares Element in der Produktion von Verbrennungsmotoren ist der **Bandende (End of Line)-Produktionsmotorprüfstand** (siehe Abb. 2-1). Diese Prüfstandskategorie hat den Zweck, die Qualität der Motoren in der Produktion nach strengen vorgegebenen Kriterien zu bewerten. Die eingesetzte Mess- und Prüftechnik sowie das Prüfverfahren sind dabei Teil des gesamten motorspezifischen Produktionsprozesses.

Die steigende technologische Komplexität von Verbrennungsmotoren führt dazu, dass die Heißprüfungen (damit wird der gefeuerte Betrieb des Prüflings beim Test bezeichnet) in der Produktion vermehrt auch im belasteten Zustand erfolgen, d. h. unter bestimmten Lastzyklen und somit unter Einsatz eines Belastungsaggregates. Nur dadurch können Funktionalität und Qualität des Motors sichergestellt werden.

Auch die sogenannte Kaltprüfung, d. h. der Motor wird ungefeuert (ohne Verbrennung) geprüft, kommt in speziellen Fällen zum Einsatz. Prüfsysteme zur Beurteilung der Produktionskonformität (Conformity of Production) ergänzen ferner das Spektrum im Bereich der stichprobenartigen Produktionsprüfung.

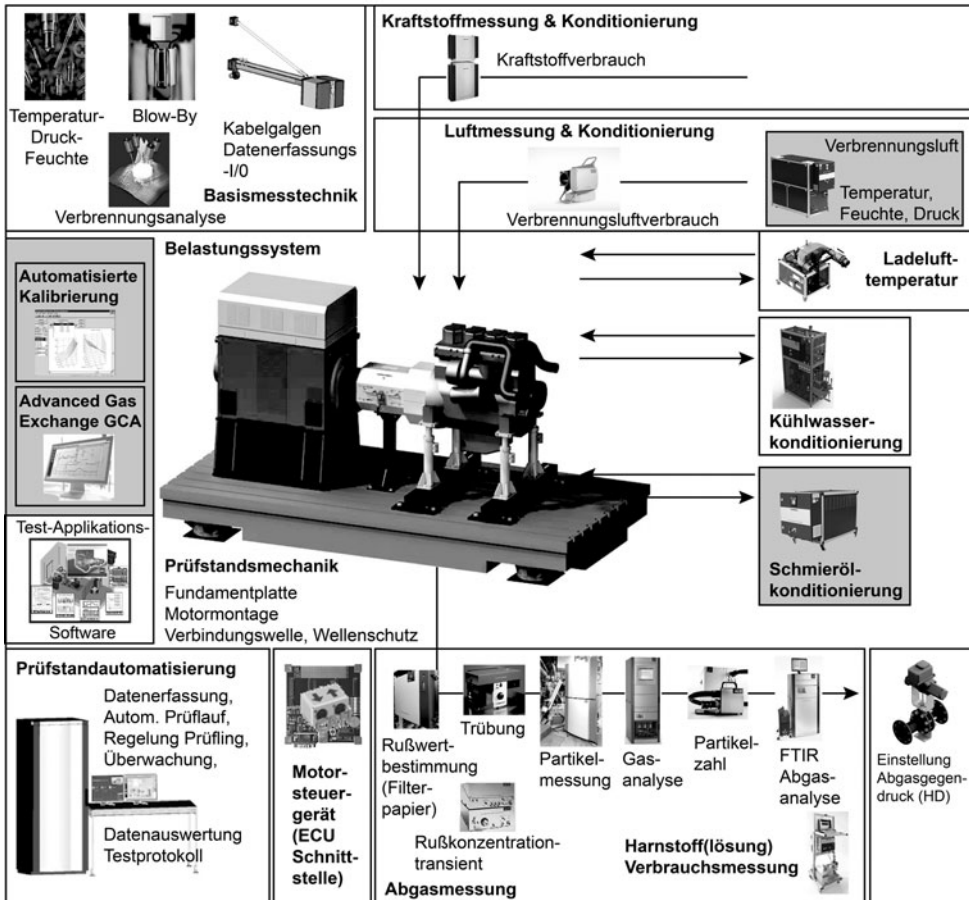
Produktionsprüfstände werden aber im Weiteren nicht mehr betrachtet, da diese nicht zu den Entwicklungsprüfständen zählen, die in diesem Buch diskutiert werden sollen.

### 2.1.2 Aufbau eines Prüfstandes für Verbrennungsmotoren

Um der Zielsetzung eines möglichst breitbandigen Einsatzes gerecht zu werden, umfassen Prüfstände für Entwicklungszwecke von Verbrennungsmotoren typischerweise die folgenden Hauptbestandteile (siehe Abb. 2-2):

- Belastungseinrichtung
- Prüfstandmechanik
- Motormedienkonditionierung
- Verbrauchsmesseinrichtungen für Kraftstoff, Verbrennungsluft und Harnstoff

- Temperatur- und Druckmessketten für motorperiphere Messstellen
- Messtechnik für die Verbrennungsdiagnose
- Blow-By-(Leckgas-)Messeinrichtung
- Abgasmesstechnik
- Kommunikationsschnittstelle zum Motorsteuergerät (ECU)
- Prüfstandautomatisierung (Regelung/Simulation)
- Kalibrierwerkzeuge zur Optimierung der Steuergerätebedatung



**Abb. 2-2** Typische Hauptumfänge eines Verbrennungsmotoren-Entwicklungsprüfstandes

In Abhängigkeit von den eingesetzten Prüfstandstechnologien wie Belastungseinrichtung und Prüfstandsautomatisierung wird grundsätzlich zwischen den nachfolgenden Kategorien von Motorprüfständen unterschieden:

- Stationäre Prüfstände
- Instationäre Prüfstände

### 2.1.3 Stationäre Motorenprüfstände

Der stationäre Prüfstand ist durch folgende Merkmale charakterisiert (siehe Abb. 2-3):

- Laststufeneinstellung mittels Drehmoment- und Drehzahlwertepaar ( $M_d / \omega$ ) und mittels Drehmoment bzw. Drehzahl-/Alphawertepaar ( $\alpha$  = Fahrhebelstellung)
- Einregelungsphase mit definierten Toleranzen
- Messung nach einer Stabilisierungsphase und bei Bedarf in Kombination mit zu erfüllenden Zusatzkriterien (z. B. das Erreichen einer bestimmten Öltemperatur)
- Auswertung der aufgenommenen Messwerte über ein bestimmtes Zeitintervall (z. B. bestimmt durch die Kraftstoffverbrauchsmessung)

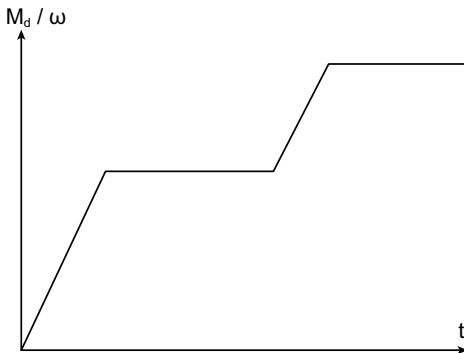


Abb. 2-3 Stationäre Betriebszustände

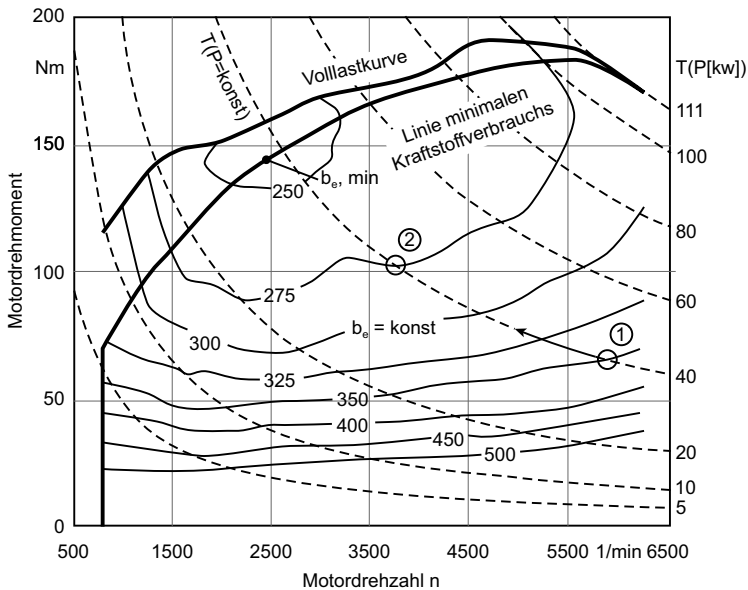
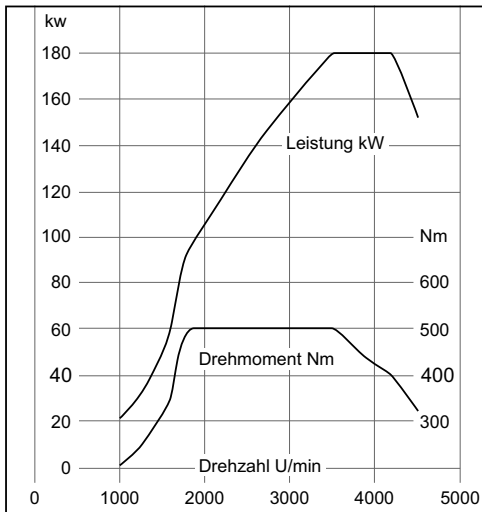


Abb. 2-4 Kraftstoff-Verbrauchskennfeld eines Motors

Stationäre Prüfstände werden in der Forschung, in der Entwicklung und in der Produktion eingesetzt. Typische Anwendungen für eine stationäre Betriebspunktabfolge sind die Aufnahme des Verbrauchskennfeldes eines Verbrennungsmotors (auch Mischschioldiagramm genannt – siehe Abb. 2-4), die Aufnahme der Vollastkurve (siehe Abb. 2-5) oder der Einsatz in der Kalibrierung von Motorfunktionen.



**Abb. 2-5** Vollastkurve eines Motors

#### 2.1.4 Instationäre Motorenprüfstände

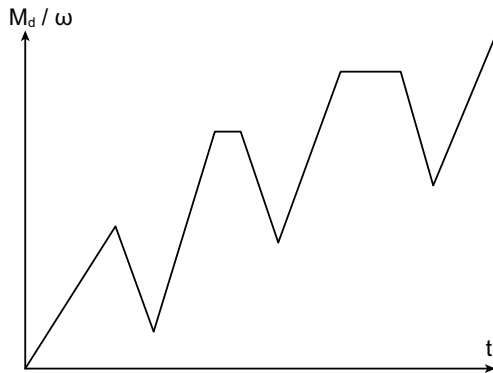
Prüfstände für instationäre Untersuchungen von Verbrennungsmotoren werden in folgende Typen unterteilt:

- Transientenprüfstand
- Dynamischer Prüfstand
- Hochdynamischer Prüfstand

Transientenprüfstände (siehe Abb. 2-6) haben folgende Merkmale:

- Lastpunktdefinition mittels Drehmoment-/Drehzahlwertepaar in Zeitschritten  $\leq 1$  Sekunde
- Kontinuierliche Regelung von Drehzahl und Drehmoment innerhalb einzuhaltender Toleranzen
- Kontinuierliche Messung und Aufzeichnung der Mess- und Rechenwerte
- Zeitaufgelöste und/oder intervallbezogene Darstellung der aufgenommenen Messwerte

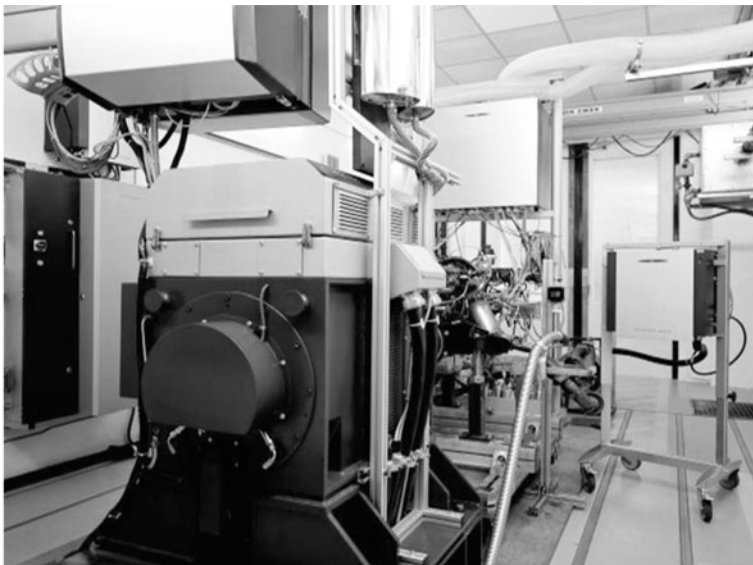
Die Einsatzgebiete des transienten Prüfstandes sind die Überprüfung des Motoransprechverhaltens auf Lastsprünge, Abgas-Homologationstests von Motoren für Nutzfahrzeuge oder Off-Road-Fahrzeug/Maschinenanwendungen (Baumaschinen, Traktoren etc.) oder die Untersuchung des Transientenbetriebes des Motors hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Emissionsbildung.



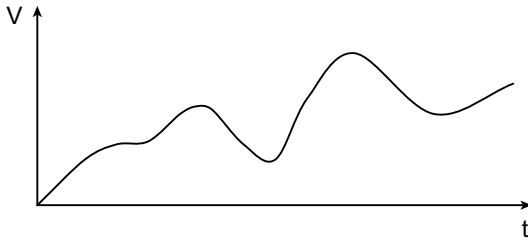
**Abb. 2-6** Transienter Prüfzyklus

Die Merkmale eines dynamischen Prüfstandes (siehe Abb. 2-7 und Abb. 2-8) sind:

- Prüfung des Motors in einem simulierten Fahrzeug-Fahrbetrieb
- Lastpunktdefinition als Geschwindigkeits-/Zeitprofil
- Simulation des Fahrzeugantriebsstranges (Antriebsstrangoszillationen bis typischerweise max. 8 Hz), des Fahrerverhaltens, der Straßenlast und der Straßenneigung (siehe Abb. 2-10)
- Kontinuierliche Messung und Aufzeichnung auch während den Übergängen der einzelnen Lastpunkte
- Zeitaufgelöste und/oder Intervalls-bezogene Darstellung der aufgenommenen Messwerte

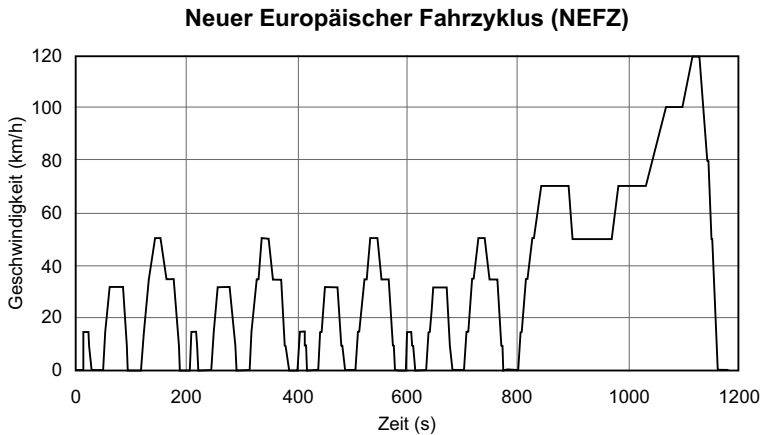


**Abb. 2-7** Transienter, dynamischer Prüfstand mit Asynchronmaschine

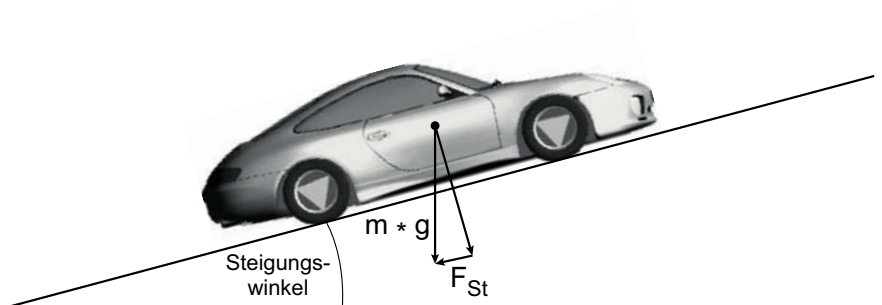


**Abb. 2-8** Dynamischer Prüfzyklus

Die Einsatzgebiete des dynamischen Prüfstandes sind die Nachbildung von Fahrzeugrollenprüfstandtests auf dem Motorprüfstand, das Abfahren gesetzlicher PKW-Abgaszyklen (siehe Abb. 2-9) nach internationalen Gesetzgebungen (z. B. EU-NEDC, US EPA FTP-75, WLTP) zur frühzeitigen Beurteilung des Motorabgasverhaltens im geplanten Fahrzeugeinsatz sowie die Optimierung der Kraftstoffeffizienz und der Abgas-Emissionen.



**Abb. 2-9** NEFZ für PKW-Abgasprüfung

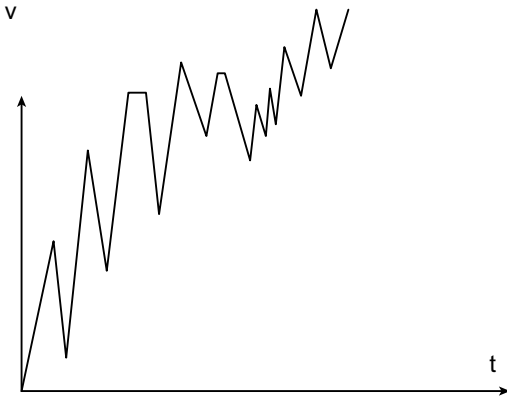


**Abb. 2-10** Dynamische Prüfstandssimulation der Straßensteigung

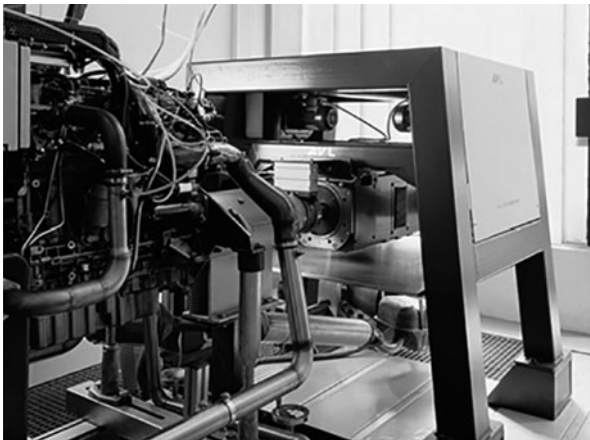


**Merkmale des hochdynamischen Prüfstandes:**

- Prüfung des Verbrennungsmotors im virtuellen Fahrzeug-, Fahrer- und Straßenumfeld unter einer höchstmöglichen realen Situation (echter Fahrbetrieb, siehe Abb. 2-11)
- Betrieb des Prüflings im kritischen Bereich zwischen Motor-, Starter- und Leerlaufdrehzahl
- Antriebsstrangsimulation bis ca. 40 Hz
- Echte Nullmomentsimulation bei Gangschaltvorgängen und in Leerlaufbetriebsphasen

**Abb. 2-11** Hochdynamischer Prüfzyklus

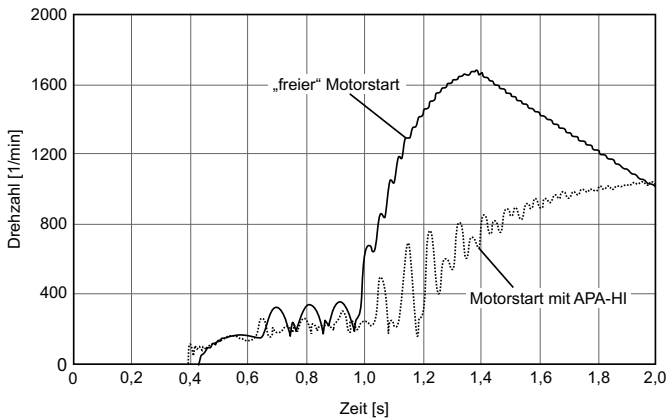
Die Einsatzgebiete des hochdynamischen Prüfstandes (siehe Abb. 2-12) sind die Kalibrierung des Motorkaltstartverhaltens ohne Fahrzeug, die Abstimmung der Fahrzeugfahrbareit ohne Fahrzeug und ohne Straße, die Durchführung realer Kraftstoffverbrauchsfahrten (Real Driving Emissions – RDE) mit echtem Motor und einem virtuellem Antriebsstrang im virtuellen Umfeld (siehe Abb. 2-13).

**Abb. 2-12** Hochdynamischer Motorprüfstand mit Synchronmaschine

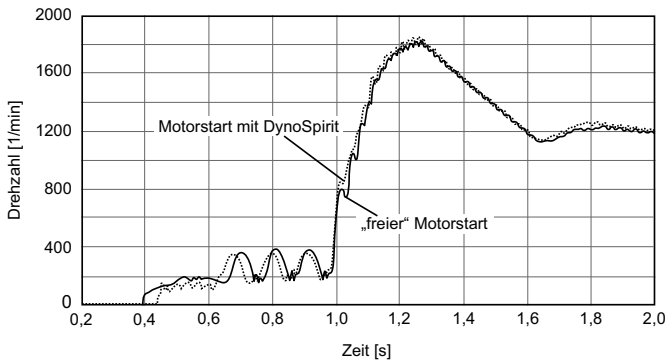


**Abb. 2-13** Manöverbasiertes Testen am Motorprüfstand

Der Unterschied zwischen einem transienten Prüfstand und einem hochdynamischen Prüfstand wird in den folgenden Bildern dargestellt (siehe Abb. 2-14 und Abb. 2-15). Dabei wird ein „freier“ realer Motorstart mit einem Motorstart am Prüfstand mit unterschiedlichen Belastungseinheiten (APA-HI für transiente Übergänge und DynoSpirit für dynamische Übergänge) verglichen.



**Abb. 2-14** Klassischer transienter Prüfstandbetriebsbereich

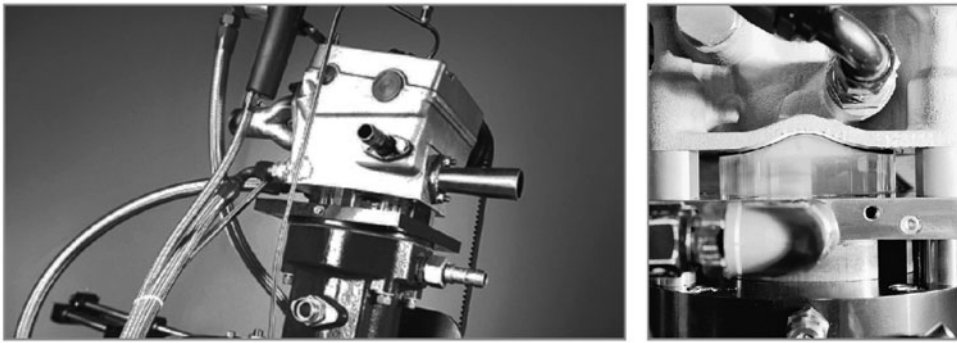


**Abb. 2-15** Hochdynamischer Prüfstandsbetriebsbereich

### 2.1.5 Forschungsprüfstände

#### Einzyklindermotorenprüfstände

**Einzyklindermotorenprüfstände** dienen vorwiegend Forschungszwecken, wie z. B. dem Verbrennungsprozess selbst. In speziellen Fällen wird eine am Zylinderkopf adaptierte Zylinderbuchse eingesetzt, welche aus Glas gefertigt ist (siehe Abb. 2-16). Dies schafft den visuellen Zugang zum Brennraum und somit die Sichtbarmachung des Einspritz- und Verbrennungsvorganges mittels optischer Messmethoden. Dadurch ist es möglich, die Erfolgsaussichten der Entwicklungsmaßnahmen unter Echtbedingungen zu untersuchen, lange bevor die Konzepte an einem Vollmotor Anwendung finden.

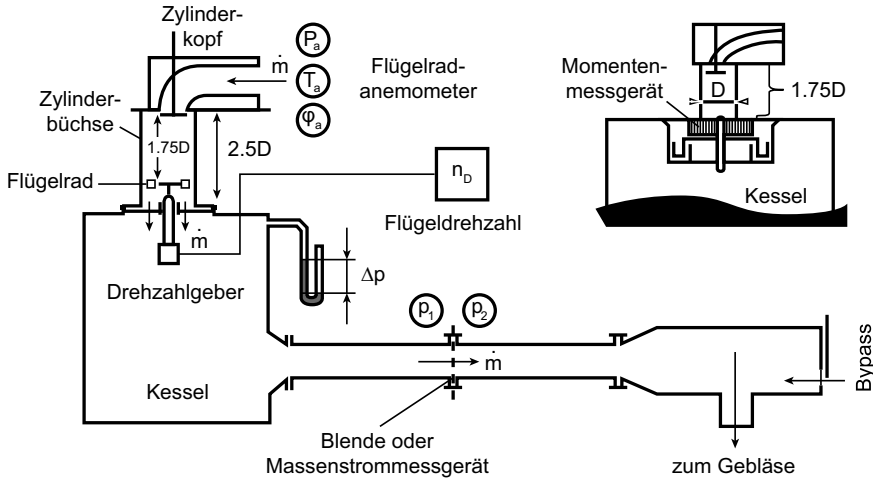


**Abb. 2-16** Einzylinderforschungsmotor

Im Falle von Großdieselmotoren erfolgt ein Hauptteil der Entwicklungsarbeiten mit Hilfe eines Einzylindermotors. Mittels geeigneter Methoden wird dabei kostenoptimiert auf die Situation im Vollmotorbetrieb eingegangen.

#### Strömungsprüfstände

Die Ladungsbewegung ist sowohl für fremd- als auch für selbstzündende Motoren ein Parameter, der die Verbrennung wesentlich beeinflusst. Um diese näher untersuchen zu können, werden Strömungsprüfstände eingesetzt. Es gibt unterschiedlichste Ausführungen von Strömungsprüfständen. Dies ist sehr stark davon abhängig, wo und für welchen Zweck diese verwendet werden. Ein Forschungs- bzw. Entwicklungsströmungsprüfstand besteht nach Abb. 2-17 im Wesentlichen aus Gebläse, Beruhigungskessel, Massenstrommessgerät, Druck-, Temperatur- und Luftfeuchtesensoren (siehe Abschnitt 3.3). Am Beruhigungskessel sind die integrativen Messgeräte (Flügelrad und/oder Momentenmessgerät) zur Drall- und Tumblebestimmung eingebaut (siehe auch Kapitel 3.3.15). Der Prüfstand sollte in der Lage sein, zwei Strömungsrichtungen darzustellen, um in einem Aufbau sowohl Ein- als auch Auslasskanäle strömen zu können. Das Messverfahren besteht im Wesentlichen in der Messung des Massenstromes und der Ladungsbewegung bei einem konstanten Druckgefälle  $\Delta p$  über dem Kanal bei typischerweise zehn verschiedenen Ventilhüben.



**Abb. 2-17** Beispiel für den Aufbau eines stationären Strömungsprüfstands zur Messung von Drall und Durchfluss von Ein- und Auslasskanälen

Bei einigen Motorenherstellern werden Zylinderköpfe fallweise stichprobenartig geströmt. Das Spektrum der Bohrungsvielfalt ist deutlich geringer als beim Forschungsprüfstand. Damit kann sowohl die Positionierung des Zylinderkopfes auf der Bohrung als auch die Einstellung des Ventilhubes automatisiert werden. In Abb. 2-18 ist ein solcher Prüfstand der Firma AVL Tippelmann dargestellt. Es sind pro Tag ca. 50–100 Messungen möglich. Weitere vollautomatische Strömungsprüfstände sind auch in Fertigungslinien von Zylinderköpfen zu finden mit einer Messkapazität von ca. 1000 Messungen pro Tag.

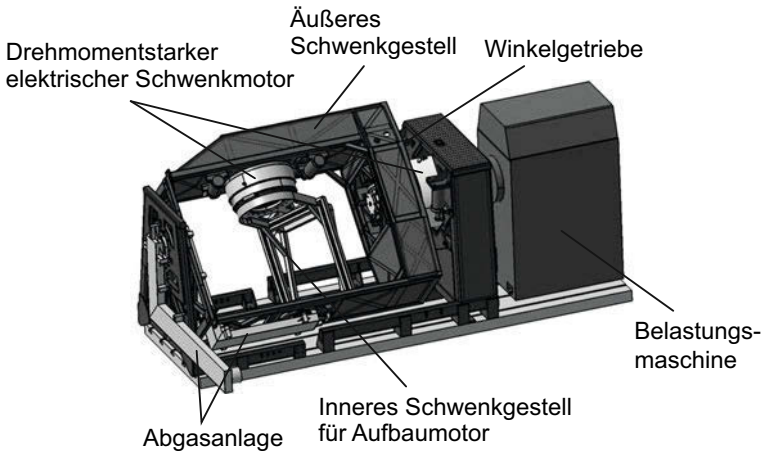


**Abb. 2-18** Vorentwicklungsprüfstand für die Strömung einzelner Zylinderköpfe

### 2.1.6 Sondermotorenprüfstände

Zur Absicherung der Motorfunktion bzw. dessen Funktionsnachweis unter speziellen Einsatzbedingungen werden Sonderprüfstände eingesetzt. Zu dieser Kategorie von Motorprüfständen werden beispielsweise folgende Typen gezählt:

- Schwenkprüfstand
- Klimaprüfstand
- Höhen-/Klimaprüfstand



**Abb. 2-19** Prüfstands Aufbau eines Schwenkprüfstands

**Schwenkmotorenprüfstände** werden zur Optimierung der ölführenden Komponenten oder der Ölverschäumung (auch Aeration genannt) sowie zur Entwicklung des Ölkreislaufs, der Kurbelgehäuseentlüftung oder für Reibungsuntersuchungen eingesetzt. Dabei wird der Verbrennungsmotor auf eine spezielle Testvorrichtung (siehe Abb. 2-19 und Abb. 2-20) montiert und kontinuierlich (z. B. über zwei Achsen veränderbare Schwenkwinkeln) dynamisch geschwenkt. Bestimmten Fahrprofilen folgend kann dabei der Verbrennungsmotor sowohl im gefeuerten als auch im geschleppten Betrieb untersucht werden.

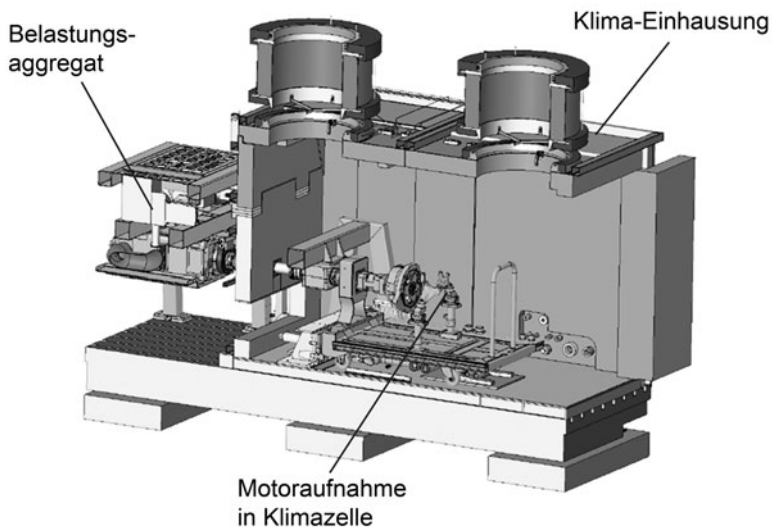
Der **Klimamotorenprüfstand** (siehe Abb. 2-21) dient dazu das Verhalten des Verbrennungsmotors auf unterschiedliche Umgebungslufteinflüsse (z. B. die Umgebungsluft entspricht der Verbrennungsluft) in Form von Temperatur- und Feuchtwerten bereits im Laborumfeld zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden Temperaturen im Bereich von ca.  $-40\text{ °C}$  bzw. bis ca.  $+50\text{ °C}$  simuliert (siehe auch Kapitel 3.2.4).

Als Beispiel für ein Untersuchungsthema sei hier das Kaltstartverhalten der Verbrennungsmaschine genannt. Neben der Überprüfung des Zündverhaltens des Motors selbst sind in diesem Zusammenhang auch die damit verbundenen Abgasemissionen zu nennen, die es mit Hilfe solcher Prüfanlagen zu untersuchen und zu optimieren gilt.



**Abb. 2-20** Dynamisches Schwenkgestell

Je nach Bedarf kann die Klimatisierung des Prüfstandes in Form einer Gesamtzellenklimatisierung oder als einfachere Klimahaube ausgeführt werden. Im letzteren Falle wird nur der Verbrennungsmotor mit einer sogenannten Klimaeinhausung versehen, die über den Prüfling gestülpt wird und es ermöglicht, Klimaumgebungsbedingungen für den Prüfling einzustellen.



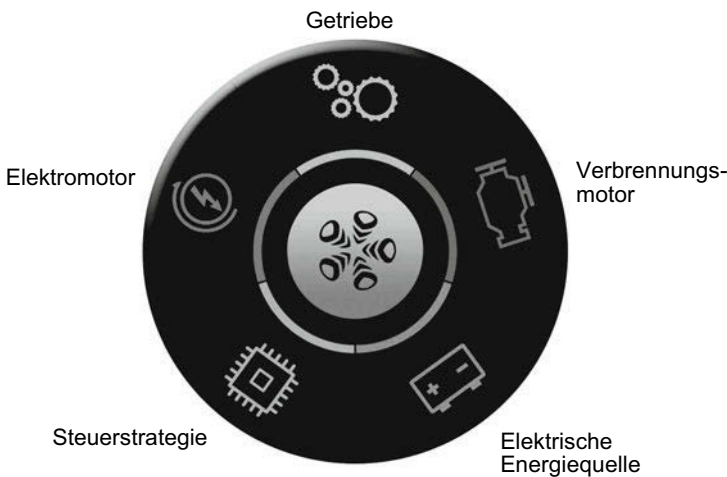
**Abb. 2-21** Klimamotorenprüfstand

In speziellen Fällen werden **Höhen-/Klimaprüfstände** bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren eingesetzt, um ergänzend zur Temperatur auch den Einfluss des Umgebungsluftdruckes auf das Motorverhalten zu untersuchen und abzustimmen. Die damit verbundene Optimierung von Kennfeldern in Motorsteuergeräten sowie die Verifizierung des Abgasverhaltens unter erweiterten Umgebungsbedingungen (z. B. „Not-To-Exceed“ Emissionen bei z. B. NFZ-Motoren) seien hier nur beispielhaft erwähnt.

Höhen-/Klimaprüfstände können als konventionelle Gesamtkammeranlagen oder als „optimierte“ Lösung umgesetzt werden. Im ersten Falle wird der gesamte Motorenprüfstand in einer Höhen-Klimakammer verbaut. Im zweiten Falle wird nur eine druckdichte Ver- und Entsorgung der Luft an allen relevanten Motorenanschlüssen und Teilen vorgenommen (Simulation einer Höhen-/Klimakammer).

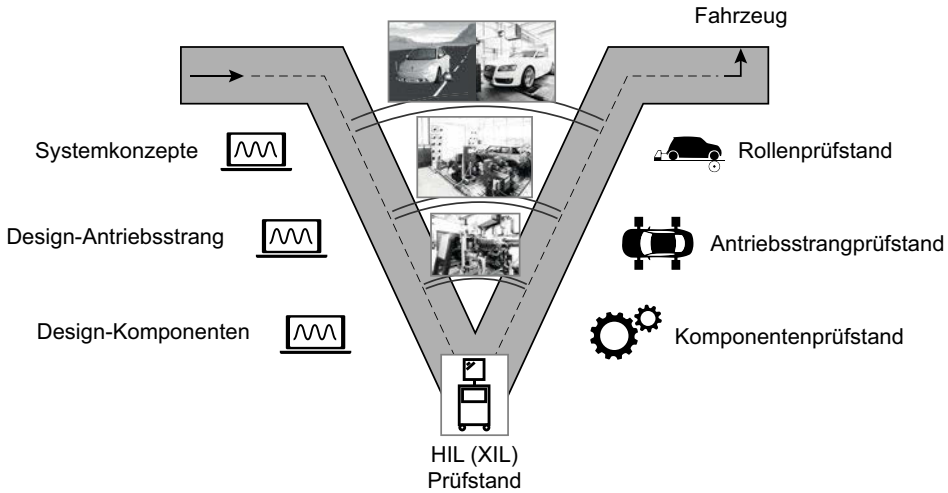
## 2.2 Komponentenprüfstände

Ein moderner Antriebsstrang verbindet den klassischen Verbrennungsmotor mit elektrischen Leistungselementen. Eine solche Anordnung besteht im Wesentlichen aus den folgenden fünf Elementen (Abb. 2-22):



**Abb. 2-22** Die fünf Elemente des Antriebsstranges

Diese Elemente werden auch als Komponenten bezeichnet und erfordern als Teil des Fahrzeugentwicklungsprozesses (Abb. 2-23) die Durchführung von Integrations- und Validierungstests an dafür geeigneten Prüfsystemen (für einen Verbrennungsmotor ist dies beispielsweise der Motorenprüfstand).



**Abb. 2-23** Fahrzeugentwicklungsprozess

### 2.2.1 Prüfstände für Verbrennungsmotorzusatzkomponenten

Prüfstände für Zusatzkomponenten von Verbrennungsmotoren dienen zur Durchführung von selektiven Funktions-, Leistungs- bzw. Dauerhaltbarkeitstests dieser Teile. Der selektive Test ermöglicht die parallele Entwicklung und Optimierung dieser Komponenten vor der Integration in den Motor.

Aufgrund der im Allgemeinen flexiblen Nutzung von Komponentenprüfständen bestehen spezielle Anforderungen an die Mess- und Automatisierungstechnik. Neben der einfachen Konfigurierbarkeit der Sensorik sind eine variable Anzahl von Sollwertkanälen mit frei definierbaren Bedeutungen und Stellgrenzen erforderlich. Das Automatisierungssystem muss es ermöglichen, für jeden beliebigen Messwert/Rechenwert frei definierbare Grenzen und zugeordnete Reaktionen festzulegen und im Falle von Grenzwertverletzungen für jeden Sollwertkanal frei definierbare Reaktionen auszuführen (siehe auch Abschnitt 4.3.4). Im Folgenden werden einige Komponentenprüfstandstypen näher erörtert.

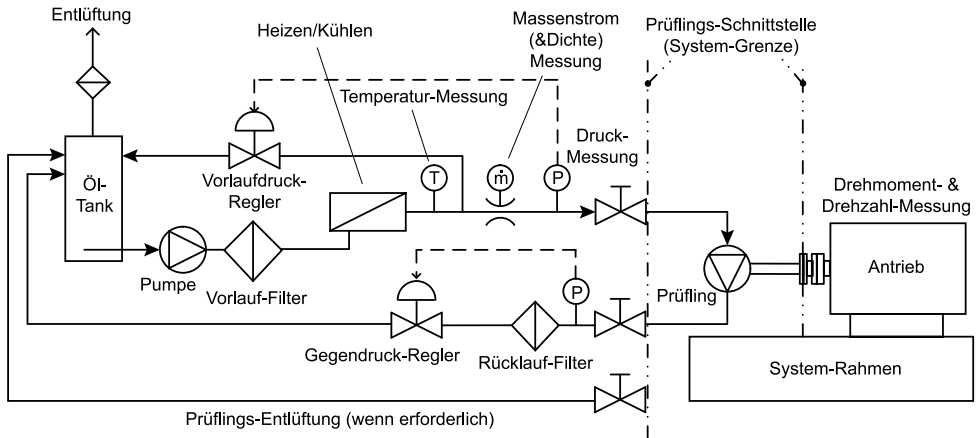
#### Prüfstände für Ölkreis-Komponenten

##### *Aufbau*

Wesentliche Komponenten im Kraftfahrzeug-Ölkreis sind:

- Schmierölpumpe (Druckpumpe)
- Saugpumpe (bei Trockensumpfschmierung)
- Ölfilter





Die anlageninterne Temperatur- und Druckmessung wird lediglich zur Anlagenregelung eingesetzt. Versuchsergebnis relevante Signale werden zusätzlich direkt am Testobjekt (Prüfling) erfasst.

**Abb. 2-24** Grundschemata Ölkreis-Komponenten-Prüfstand

Zum Test dieser Komponenten ist eine Prüfstandsordnung erforderlich, die folgende Aufgaben übernehmen kann:

- Bereitstellung des Testmediums (Motoröl) mit einstellbaren Parametern (Druck, Volumenstrom und Temperatur)
- Luftabscheidung im Ölvorratsbehälter
- Regelung des Gegendruckes (im Ölrücklauf des Prüflings)
- Messung von Öltemperatur, Massenstrom und Dichte (gegebenenfalls auch im Rücklauf)
- Drehzahlregelung des Antriebs für die Prüfkompnenten mit Drehzahl- und Drehmomentmessung
- Regelbare Luftbeimengung zum Öl (für Versuche mit Saugpumpen; diese kann während des Prüflaufes verändert werden)

Die folgenden Applikationen sind typischerweise mit derartigen Anlagen darstellbar:

- Aufnahme von Druckpumpenkennfelder mit den Parametern Zulaufdruck, Gegendruck, Temperatur, Drehzahl; für Kavitationsversuche (negative Zulaufdrücke) sind spezielle Unterdruckregler an der Anlage erforderlich.
- Aufnahme von Saugpumpenkennfeldern mit den Parametern Zulaufdruck, Gegendruck, Temperatur, Drehzahl, Öldichte (Verschäumungsgrad), Fördervolumen; die Bereitstellung des Prüfmediums mit den geeigneten Parametern (Öl/Luftanteil) und seiner Konsistenz (Ölschaum) ist mit geeigneten Zusatzaufbauten zu realisieren.
- Filterkennlinien mit den Parametern Temperatur, Durchflussmenge (gegebenenfalls auch der Öldichte).
- Strömungsversuche am Motorblock oder Zylinderkopf bzw. diversen sonstigen Bauteilen.
- Dauerhaltbarkeitsversuche

### **Anlagendimensionierung**

Die Kühlleistung der Anlage richtet sich zumindest nach der Leistung des installierten Antriebes für die Prüflingskomponente. Sie sollte jedoch auch den Abkühlvorgang von der maximalen Temperatur auf 25 °C in längstens 15 Minuten (am Ende des Prüflaufes) ermöglichen. Längere Abkühlzeiten erhöhen die Wartezeit bis der Prüfling abgebaut werden kann und reduzieren somit die Produktivität der Anlage. Für die Aufheizzeit der Anlage (von Umgebungs- auf Prüftemperatur) sind ähnliche Zeiten anzustreben. Bei der Auslegung der Heizelemente ist auf die zulässige Temperatur des Prüfmediums zu achten. Für Elektroheizstäbe soll eine Oberflächenleistung von 1.5–2.0 W/cm<sup>2</sup> nicht überschritten werden.

Für eine in allen Bereichen gute Druckregelung soll der maximale Volumenstrom für die Ölförderpumpe mindestens 15 % über der maximal erforderlichen Fördermenge liegen. Um auch bei geringen Fördermengen niedrige Vorlaufdrücke einregeln zu können, soll die Ölförderpumpe mit einer (von der Fördermenge gesteuerten) Drehzahlregelung versehen werden. Die Volumenstromregelung, z. B. für Filterkennlinien, kann mittels (unterlagerter) Druckregelung realisiert werden.

Sonstige Hinweise:

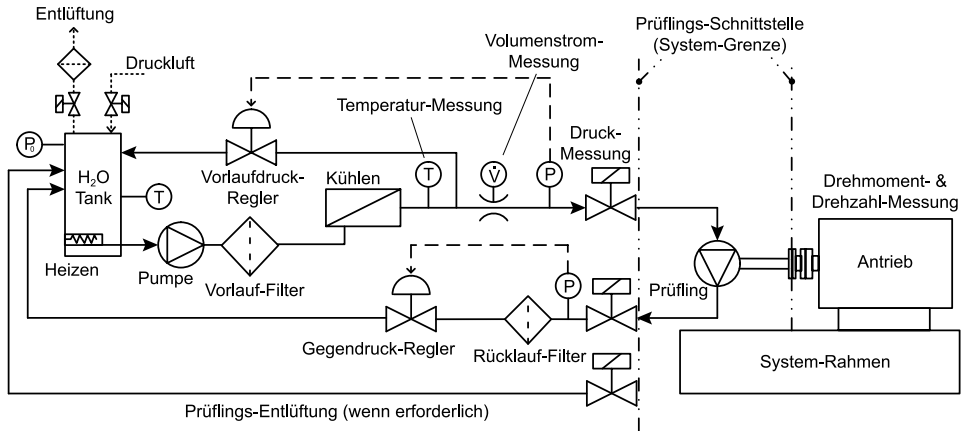
- Das Anlagevolumen (Ölvolumen) soll möglichst gering sein. Dies reduziert neben den Aufheiz- und Abkühlzeiten auch den Verbrauch beim Wechsel des Prüfmediums (Öl) und somit die Betriebskosten der Anlage.
- Bei der Dimensionierung der anlageninternen Ölfilter ist auf die niedrigste Temperatur und die geringste Viskosität des Prüfmediums zu achten. Ansonsten kann es bei niedrigen Öltemperaturen zu unzulässig hohen Differenzdrücken am Ölfilter kommen.
- Die Möglichkeit einer einfachen und vollständigen Entleerung der Anlage muss gegeben sein, ebenso der rasche und einfache Wechsel der Ölfilter.
- Bei der Auswahl des Systems für die hydraulischen Schnittstellen zum Prüfling ist zu beachten, dass am Ausgang einer Ölpumpe (Prüfling) Druckpulsationen herrschen können. Daher müssen Schnelkkupplungen für diese permanenten Pulsationen geeignet sein.
- Eine Störung der anlageninternen Ölpumpe muss zum sofortigen Stillstand des Prüflings führen.

### **Prüfstände für Wasserkreis-Komponenten**

#### **Aufbau**

Wesentliche Komponenten im Wasserkreis eines Kraftfahrzeugs-sind:

- Wasserpumpe
- Kühler
- Motorblock
- Thermostat



Die anlageninterne Temperatur- und Druckmessung wird lediglich zur Anlagenregelung eingesetzt. Versuchsergebnis relevante Signale werden zusätzlich direkt am Testobjekt (Prüfling) erfasst.

**Abb. 2-25** Grundschemata Wasserkreis-Komponenten-Prüfstand

Zum Test dieser Komponenten ist eine Prüfstandsordnung erforderlich, welche die folgenden Aufgaben übernehmen kann:

- Bereitstellung des Testmediums (Kühlmedium) mit regelbaren Parametern (Zulaufdruck, Volumenstrom, Temperatur). Des Weiteren muss der Prüfstand den je nach Temperatur erforderlichen statischen Anlagedruck herstellen können.
- Regelung des Gegendruckes (im Wasserrücklauf des Prüflings).
- Messung von Wassertemperatur und Volumenstrom sowie Zulauf- und Gegendruck.
- Drehzahlregelung des Antriebs für die Prüfkomponente mit Drehzahl- und Drehmomentmessung.

Die folgenden Anwendungen sind typischerweise mit derartigen Anlagen darstellbar:

- Aufnahme von Wasserpumpenkennfeldern mit den Parametern Zulaufdruck, Gegendruck, Drehzahl; für Kavitationsversuche (negative Zulaufdrücke) sind spezielle Unterdruckregler an der Anlage erforderlich.
- Strömungsversuche (Aufnahme von Kennlinien) von Motorblock, Zylinderkopf, Kühlern bzw. diversen sonstigen Bauteilen.
- Kühlleistungsversuche (diese erfordern ein regelbares Gebläse)
- Dauerhaltbarkeitsversuche

### Anlagendimensionierung

Die Dimensionierung der Anlage richtet sich nach den maximalen Testbedingungen. Für den oberen Temperaturbereich ist eine Reserve von +20 °C bis +30 °C empfehlenswert. Bei Anlagen für den Tieftemperaturbereich ist diese Planungsreserve aufgrund von rasch steigenden Kosten (für den Kältebereich) kleiner zu wählen. Die Kühlleistung der Anlage richtet sich zumindest nach der Leistung des installierten Antriebes für die Prüflingskomponente. Sie sollte jedoch auch den Abkühlvorgang von der maximalen Temperatur

auf 25 °C in längstens 15 Minuten (am Ende des Prüflaufes) ermöglichen. Längere Abkühlzeiten erhöhen die Wartezeit bis der Prüfling abgebaut werden kann und reduzieren somit die Produktivität der Anlage. Für die Aufheizzeit der Anlage (von Umgebungsauf Prüftemperatur) sind ähnliche Zeiten anzustreben. Bei der Auslegung der Heizelemente ist auf die zulässige Temperatur des Prüfmediums zu achten. Für Elektroheizstäbe soll eine Oberflächenleistung von 5 W/cm<sup>2</sup> nicht überschritten werden.

Für eine in allen Bereichen gute Druckregelung soll der maximal erlaubte Volumenstrom der Förderpumpe mindestens 15 % über der maximal erforderlichen Fördermenge liegen. Um auch bei geringen Fördermengen niedrige Vorlaufdrücke einregeln zu können, soll die Förderpumpe mit einer (von der Fördermenge gesteuerten) Drehzahlregelung versehen werden. Die Volumenstromregelung, z. B. für die Aufnahme von Strömungswiderstandskennlinien, kann mittels (unterlagerter) Druckregelung realisiert werden.

Sonstige Hinweise:

- Bei der Druckmessung und Regelung am Prüfling muss der statische Anlagendruck berücksichtigt werden.
- Die Auslässe zum/vom Prüfling (bzw. zur Anlage) sind mit elektrisch schaltbaren Kugelhähnen zu versehen, welche in den Nothalt-Kreis einbezogen sind.
- Die Anlagensteuerung muss eine sichere Abkühlung der Anlage inklusive des Prüflings gewährleisten. Wird die Anlage per Nothalt gestoppt, so ist von einem überhitzten Prüfling auszugehen und entsprechende Sicherheitsmaßnahmen sind zu setzen (es besteht eine Dampfgefahr bzw. Druckgefährdung, wenn die Verbindungsleitungen zum Prüfling sofort geöffnet werden).
- Eine Dampfblasenbildung ist an jeder Anlagenposition zu verhindern. Dabei ist besonders auf folgende Punkte zu achten: Die Position mit größter Temperatur (diese liegt nach der Heizung) und die Position mit geringstem Druck (sie befindet sich vor der Pumpe).
- Wird die Anlage mit überhitztem Wasser betrieben, kann auch nach Stillsetzen (der Pumpen) eine Gefahr vom Aufbau ausgehen! Es sind entsprechende Sicherheitsvorkehrungen zu treffen.

### 2.2.2 Prüfstände für Heißgaskomponenten

Durch den zunehmenden Einsatz von Aufladetechnologien in Diesel- und Ottomotoren wird die präzise thermodynamische Vermessung auf einem Prüfstand für Heißgaskomponenten ein wichtiges Werkzeug zur Verbesserung des Motorwirkungsgrades sowie zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen. Um ein möglichst effizientes Zusammenwirken von Aufladung und Motor erreichen zu können, müssen die Kennfelder von Ladern ermittelt werden, welche dann als Eingangsparameter zur Laderanpassung an Motoren und Simulation von Gaswechselvorgängen verwendet werden.

Die Vermessung dieser Kennfelder wird an einem eigens für diese Komponente entwickelten Heißgasprüfstand vollzogen. Somit besteht die Aufgabe dieses Prüfstandstyps,

den Prüfling unabhängig vom Verbrennungsmotor in normiertem Vermessungsaufbau in einem möglichst weiten Kennfeldbereich zu betreiben und zu vermessen.

### Physikalische Grundlagen

Die effektive Leistung einer Verbrennungskraftmaschine ist proportional abhängig von Mitteldruck, Drehzahl und Hubvolumen, wie in der nachstehenden Formel ersichtlich ist:

$$P_e = p_m \cdot \omega \cdot V_h \cdot \frac{1}{Z}$$

$P_e$  effektive Leistung [kW]  
 $p_m$  Mitteldruck [Pa]  
 $\omega$  Drehzahl [ $\frac{1}{s}$ ]  
 $V_h$  Hubvolumen [ $m^3$ ]

**Gleichung 2-2** Effektive Leistung

Bei einem Viertaktmotor hat Z den Wert 2, bei einem Zweitaktmotor den Wert 1. Wird das Hubvolumen erhöht, steigt die Motorleistung. Der Motorwirkungsgrad sinkt jedoch z. B. bedingt durch erhöhte Reibleistung. Zusätzlich steigt die Masse und Baugröße des Motors, was dem Bestreben des Leichtbaus entgegenwirkt.

Eine Steigerung der Leistung kann durch Erhöhung der Drehzahl erreicht werden, was jedoch einen überproportionalen Anstieg der Reibleistung und der Gaswechselverluste hervorruft. Um keine Leistungseinbußen in Kauf nehmen zu müssen, werden Mitteldrucksteigerungen angestrebt. Dies wird unter anderem über die Aufladung realisiert (Downsizing- und DownsPEEDing-Strategien). Dadurch erreicht man die Verschiebung des Motorlastpunktes in Bereiche mit besserem spezifischem Verbrauch.

Die Abhängigkeiten für den Mitteldruck lassen sich wie folgt formulieren:

$$p_m = \rho \cdot H_u \cdot \eta_e \cdot \frac{\lambda_L}{\lambda \cdot L_{\min}}$$

**Gleichung 2-3** Mitteldruckberechnung

Der Heizwert  $H_u$  und das Mindestluftverhältnis  $L_{\min}$  sind Kennwerte des Brennstoffes und können als gegeben vorausgesetzt werden. Somit ist der Mitteldruck proportional der Luftdichte  $\rho$  nach dem Verdichter, dem effektiven Wirkungsgrad  $\eta_e$ , dem Liefergrad  $\lambda_L$  sowie umgekehrt proportional dem Luftverhältnis  $\lambda$ .

$$p_m \sim \rho \cdot \eta_e \cdot \frac{\lambda_L}{\lambda}$$

**Gleichung 2-4** Mitteldruck in Abhängigkeit der Prozessgrößen

Die Dichte der Luft lässt sich durch die allgemeine Gasgleichung beschreiben:

$$\rho = \frac{p}{R_g \cdot T}$$

$R_g$  Gaskonstante  $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$   
 $p$  Ladedruck [Pa]  
 $T$  Temperatur [K]

**Gleichung 2-5** Dichte der Luft

Um die Dichte – und somit auch die Motorleistung – zu steigern, kann zum einem der Ladedruck erhöht und zum anderen die Lufttemperatur gesenkt werden. Dies wird durch Verdichter bzw. Ladeluftkühler erreicht.

### Aufladungsprinzipien

Grundsätzlich gibt es mehrere Arten von Aufladungsprinzipien:

- **Mechanische Aufladung:** Bei diesem Aufladungsprinzip ist der Verdichter mechanisch mit der Kurbelwelle verbunden. Beispiele für eingesetzte Verdichter sind Rootsgebläse, Schraubenverdichter und Spirallader. Es können variable Übersetzungsverhältnisse vorgesehen werden (z. B. Anbindung der Kompressoren über CVT-Getriebe oder Ähnlichem)
- **Abgasturboaufladung:** Bei diesem Aufladungsprinzip ist der Verdichter sowohl thermodynamisch als auch mechanisch mit dem Motor gekoppelt. Eine Turbine wird mit den Abgasen des Motors beaufschlagt. Verdichter und Turbine sind über eine Welle verbunden. Somit deckt die Turbine den Leistungsbedarf des Verdichters, welcher die Aufladearbeit verrichtet.
- **Hybride Aufladeformen:** Bei diesem Prinzip werden Elektrogeneratoren zur Gewinnung von elektrischer Energie verwendet, die durch Abgase über Turbinen angetrieben werden. Diese wird dann zur elektromotorischen Aufladung (Turbogenerator und E-Booster) benutzt. Damit besteht keine direkte mechanische Koppelung zwischen Turbine und Verdichter, was im Turboladerbetrieb weitere Flexibilität eröffnet.

### Turboladerprüfstand

#### Aufbau

In den meisten Fällen wird der Turbolader stationär betrieben, einige Anwendungsfälle im Dauerlauf erfordern aber auch einen transienten Betrieb.

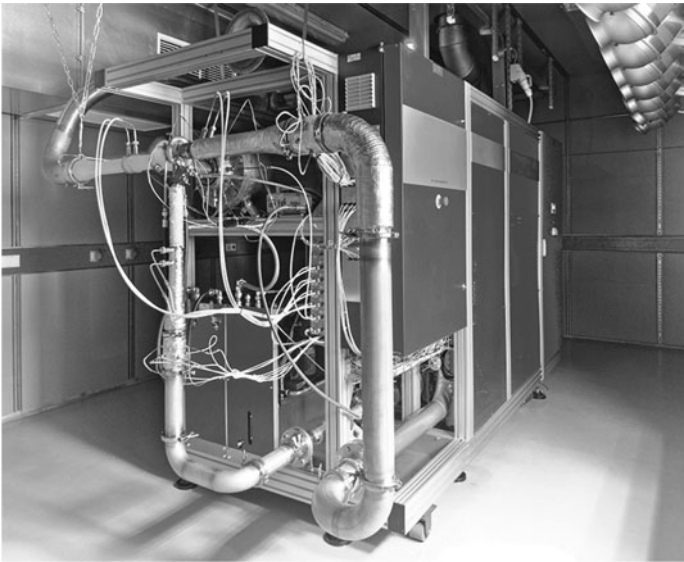
In beiden Betriebsfällen sind folgende Maßnahmen gefordert:

- Erzeugung von Heißgas, welches der Turbine zugeführt wird
- Ölversorgung für die (meist) hydrodynamische Gleitlagerung
- Steuerung/Regelung des Verdichterdurchsatzes über ein Ladedruckregelventil

Zudem sind von Vorteil:

- Konditionierung der Ansaugluft zur Stabilisierung der Betriebsbedingungen
- Kühlwasserversorgung (nur bei wassergekühlten Turboladern)

Die wichtigsten Bestandteile eines Turboladerprüfstandes bestehen neben dem Prüfling aus dem Prüfstandsrahmen, den Rohrleitungen für Kühlmittel, Kraftstoff, Prozessluft und Verdichterluft sowie den zugehörigen Regelorganen und Messstellen. Zudem benötigt man eine Prozessluftversorgung, eine Brennstoffversorgung, eine Öl- und Kühlmittelkonditionierung, Sensoren, Steuergeräte sowie das Automatisierungssystem.

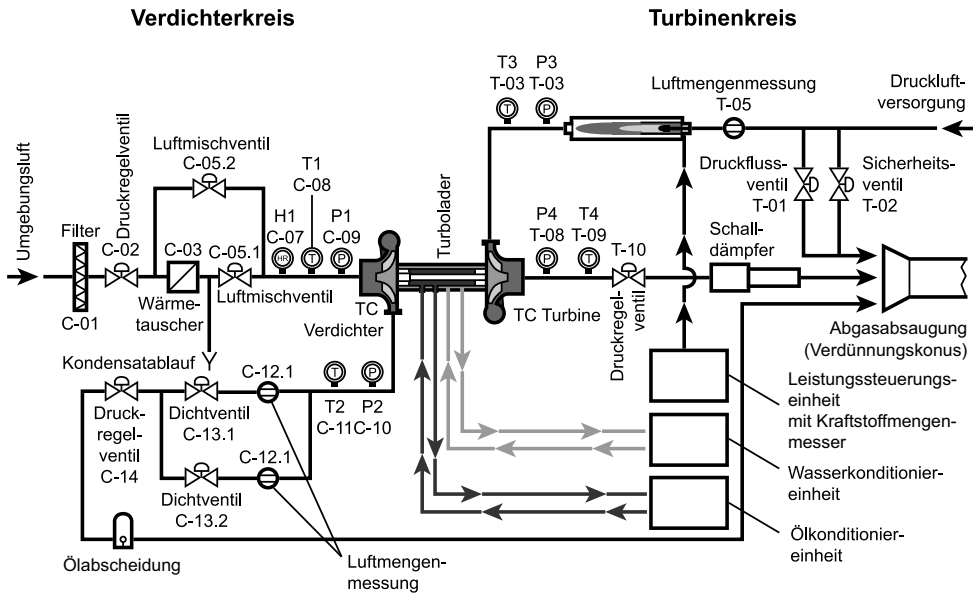


**Abb. 2-26** Turboladerprüfstand

Diese Komponenten lassen sich in Turbinenkreis, Verdichterkreis, Konditioniersysteme, elektrische Anlagen sowie Automatisierung und Regelung unterteilen. Abb. 2-27 zeigt die relevanten Bauteile des Verdichter- und Turbinenkreises sowie die Konditioniersysteme.

### ***Turbinenkreis***

Das heiße Verbrennungsgas wird durch die Verbrennung von getrockneter Druckluft und Diesel bzw. Heizöl oder komprimiertem Erdgas (CNG – Compressed Natural Gas) innerhalb einer Brennkammer erzeugt. So wird ein stationärer Heißgasstrom gewonnen. Die verdichtete Prozessluft stellt meist ein elektrisch betriebener Kompressor zur Verfügung – wahlweise mit Volumenstrom- oder tankeinspeisender Druckregelung. Für die Regelung des Druckluftmassenstromes und die Vermessung des der Turbine zugefügten Leistungsniveaus werden die Zustandswerte wie Druck, Temperatur, Laderdrehzahl und Massenstrom durch Sensoren im Prüfstandsaufbau gemessen.



**Abb. 2-27** Schematischer Aufbau eines Turboladerprüfstandes

Die Vorteile von Heizöl, Diesel oder Biodiesel liegen darin, dass die Anforderungen an die Gebäudetechnik geringer sind als für Erdgas. Außerdem wird eine – basierend auf der spezifisch anderen Brennerbauweise – über dem Rohrquerschnitt homogenere Temperaturverteilung erreicht als beim Erdgasbrenner, was die Qualität der Energiebilanz der Turbine verbessert. Komprimiertes Erdgas als Brennstoff hat wiederum den Vorteil einer etwas höheren Heißgasspitzentemperatur und ist auch im Betrieb günstiger. Wenige Prüfstände werden mit verdampftem LPG (Liquid Pressurized Gas) betrieben.

Typische Nennleistungen der Brennkammern liegen zwischen 200 kW und 800 kW. In Teillastbereichen kleinerer Brennkammern werden auch Leistungen von unter 5 kW realisiert. Die der Turbine bereitgestellte Abgasleistung kann durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$P = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_E - T_A)$$

$P$  Leistung [kW]

$\dot{m}$  Massenstrom  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$

$\Delta h$  spezifische Enthalpiedifferenz  $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right]$

$c_p$  Wärmekapazität  $\left[\frac{\text{J}}{\text{K}}\right]$

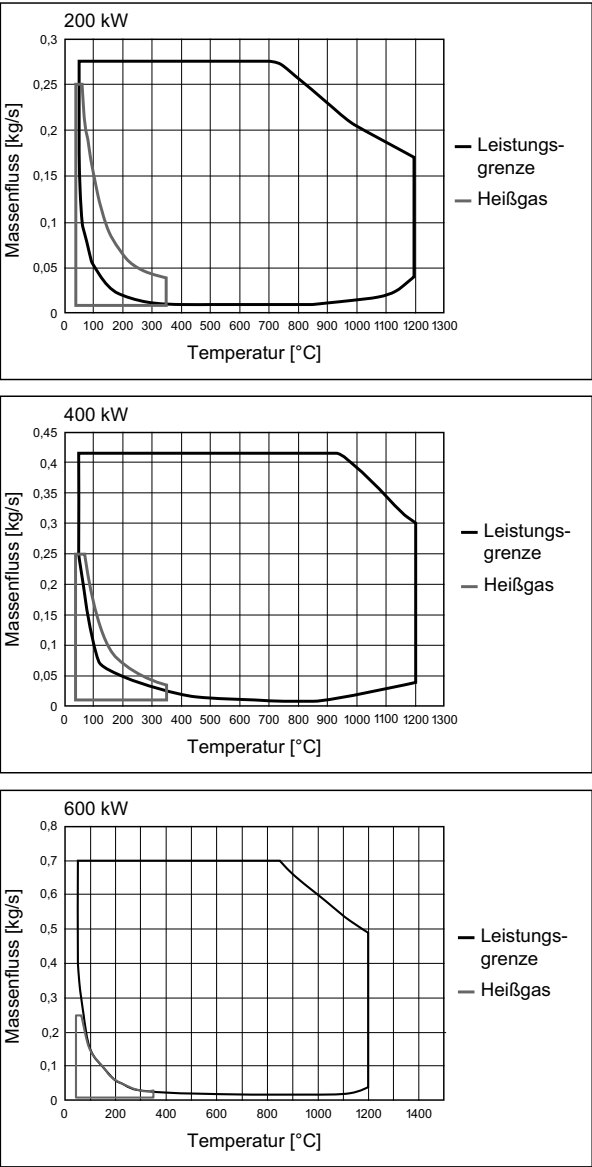
$T_E$  Turbineneingangstemperatur [K]

$T_A$  Turbinenausgangstemperatur [K]

**Gleichung 2-6** Abgasleistung der Turbine

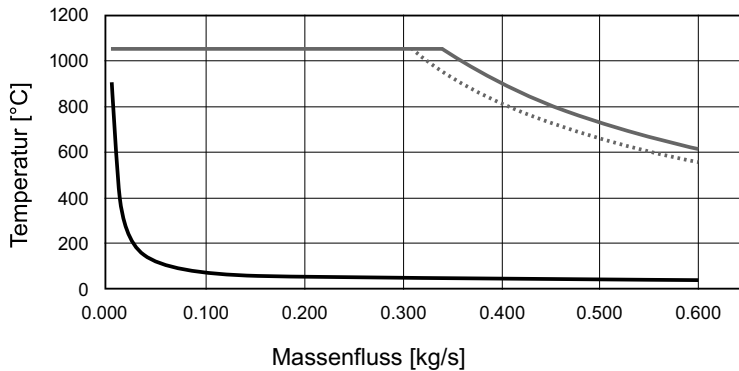


Das der Turbine zugeführte Heißgas hat ein Temperaturniveau zwischen 200 °C und 1200 °C. Leistungskennfelder werden mit einer auf 600 °C bzw. 620 °C stabilisierten Temperatur gemessen, was den bestehenden Vermessungskonventionen entspricht. Um den ganzen Einsatzbereich von derzeit gängigen automotiven Turboladern vermessen zu können, müssen Massendurchflüsse zwischen 0,005 kg/s bis ca. 1 kg/s abgedeckt werden. Dies ist nur schwer mit einem einzigen Prüfaufbau möglich (siehe Abb. 2-28 und Abb. 2-29).



**Abb. 2-28** Beispiele – Temperatur über Massenfluss von CNG-Brennkammern 200 kW, 400 kW und 600 kW

Der Prüfling wird am Austritt der Brennkammer montiert. Durch die im Gehäuse der Abgasturbinenstufe integrierte Leiteinrichtung wird der Heißgasstrom beschleunigt und in Drall versetzt, was mit kinetischer Energie gleichzusetzen ist. Dieser Drall wird nun im darauffolgenden Laufrad der Turbine genutzt, um die Welle und somit auch den Verdichter in eine Rotation zu versetzen. Dem Heißgas wird in dieser Turbinenstufe ein Teil seiner inneren Energie – bestehend aus thermischer, kinetischer und Druckenergie – entzogen. Das Abgas wird dann vom Prüfstand für den Prüfling rückwirkungsfrei abgeführt.



**Abb. 2-29** Massenfluss über Temperatur eines 380-kW-Dieselmotors

### **Verdichterkreis**

Der Verdichter wird durch die Turbine über die gemeinsame Laderwelle angetrieben. Die dadurch angesaugte Luft wird druckverlustarm vorgefiltert, über eine Konditioniereinheit automatisch geregelt und in dem gewünschten Zustand gehalten. So lassen sich äußere Einflüsse und die dadurch nachträglich notwendigen Korrekturrechnungen vermeiden sowie die nicht trivial korrigierbare Pumpgrenze stabilisieren. Um ein Kennfeld vermessen zu können ist es notwendig, Parameter wie Feuchtigkeit, Temperatur und Druck der angesaugten Luft aufzunehmen. Dies geschieht über entsprechende Sensoren in der Ansaugapparatur. Der Luftstrom gelangt nun in die Verdichterstufe. Über das Laufrad des Verdichters wird dem Medium (hier Luft) kinetische Energie hinzugefügt, d. h. es wird beschleunigt. Im darauffolgenden Diffusor wird diese zugeführte kinetische Energie durch Verzögerung in Druckenergie umgewandelt. Da dies nicht verlustfrei erfolgt, entsteht zusätzliche Verlustwärme. Um die Vermessung des Kennfeldes betreiben zu können, sind auch hier wieder die Eigenschaften der verdichteten Luft wie Temperatur, Druck und Massenfluss zu messen. Dazu passiert die verdichtete Luft eine Massenstrommessung und anschließend eine Drosselklappe, die den Massenstrom regelt.

### **Konditioniersysteme**

Die Welle, auf der Turbinen- und Verdichterrad angebracht sind, wird üblicherweise durch Gleitlager geführt. Die Lager werden mit Schmier- und Kühlöl versorgt. Durch eine Konditioniereinheit kann dieses Öl auf beliebige einstellbare Betriebspunkte ge-

bracht werden. Die Ölkonditionierung regelt Temperatur, Druck und ggf. Massenfluss des Öls. Die erreichbaren Temperaturen liegen typischerweise zwischen 40 °C und 130 °C, in besonderen Fällen von 20 °C bis 150 °C. Die regelbare Druckspanne reicht von ca. 1,2 bar bis 6 bar absolut. Zudem wird auf manchen Prüfständen eine Simulation des Kurbelgehäusedrucks durchgeführt, wodurch das Druckgefälle über das Wellenlager verändert wird. Diese Werte haben alle direkten Einfluss auf den Laderwirkungsgrad.

Das Turbinenrad und das Gehäuse werden durch das Abgas der Brennkammer stark erhitzt. Diese Wärme wird teilweise über das Schmieröl abgeführt, teilweise aber auch in das Verdichtergehäuse sowie in die Welle eingeleitet. Aufladesysteme speziell bei Ottomotoren werden unter Volllast höchsten Abgastemperaturen von ca. 1050 °C ausgesetzt, die an die Grenzen der verfügbaren Materialien gehen. Um diese Wärmemengen kontrolliert abtransportieren zu können und die Bauteiltemperaturen im Interesse der Haltbarkeit abzusenken, wird bei einigen Abgasturboladern ein Kühlwasserkreislauf eingesetzt. Zudem wird damit der Verdichtungswirkungsgrad verbessert, da ein Teil der Kompressionswärme bereits vor dem Ladeluftkühler abgeführt werden kann, was in Summe zu höheren Ladungsdichten im Brennraum führt.

Dieses Kühlwasser wird über eine eigene Konditioniereinheit in dem vorgegebenen Zustand (Durchfluss und Temperatur typischerweise bei 70 °C bis 110 °C) gehalten.

### ***Elektrische Anlagen***

Sämtliche elektrische Geräte, wie Sensoren und Aktuatoren, werden über I/O Einheiten mit dem Automatisierungssystem verbunden (siehe auch Seite 282). Die elektrischen Schaltschränke sind am Prüfstand üblicherweise in Prüflingsnähe angebracht, um die kürzestmögliche Leitungsführung von der Messstelle zum Messverstärker sicherzustellen. Über diese Schaltschränke ist das in der Leitwarte stationierte Automatisierungssystem mit dem Prüfstand verbunden.

### ***Automatisierung***

Das Automatisierungssystem (siehe auch Seite 337) stellt die Schnittstelle zwischen dem physikalischen Prüfaufbau und dem Prüfstandsbetreiber her (siehe Abb. 2-30). Es sichert die stabile Regelung der Prüflingszustände ab und stellt die Messdatenerfassung, Verrechnung und Speicherung der Messergebnisse sicher. Im Postprocessing (siehe auch Seite 350) werden die Kennfelder errechnet und grafisch dargestellt. Bevorzugt erfolgt dies bereits online während des Prüfvorganges. Im Automatisierungssystem wird auch der vordefinierte Prüflauf abgefahren. Ziel muss immer das unbemannte Fahren des Prüfstandes sein, um einen kosteneffizienten Prüfbetrieb zu realisieren. Sofern Dauerlaufversuche gefahren werden, erstrecken diese sich auf bis zu 500 Stunden. Hier ist der unbemannte dauerhafte Betrieb eine Grundvoraussetzung.

### ***Prüfbetrieb***

Der Prüfbetrieb umfasst zwei Kernbereiche

- Funktions- und Leistungsmessungen
- Dauerlauf- und Haltbarkeitsprüfungen

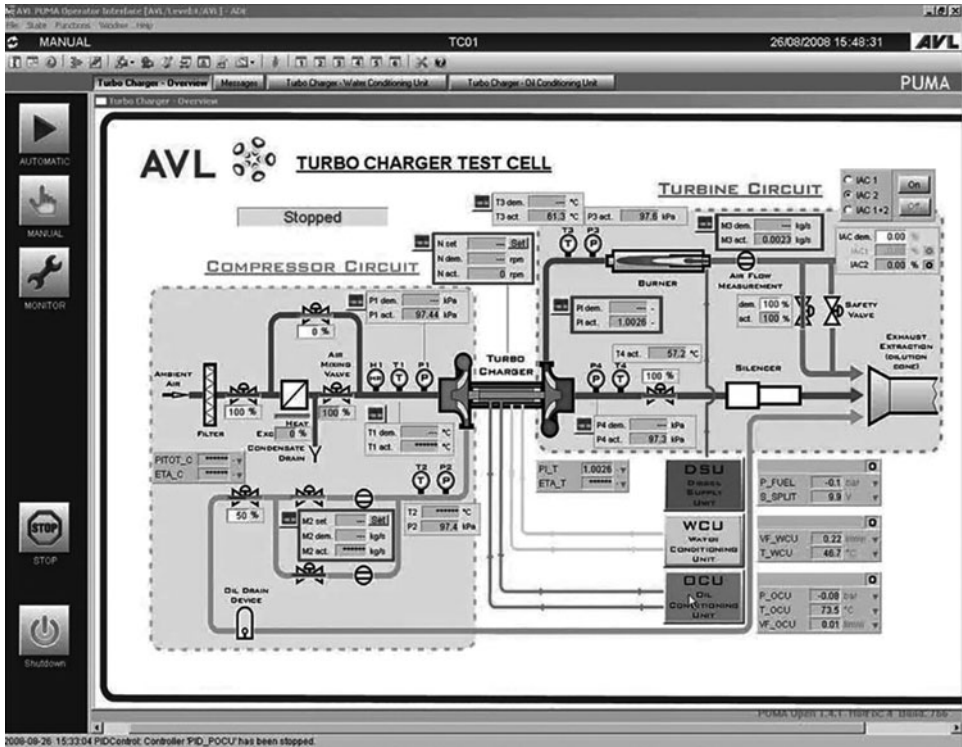


Abb. 2-30 Screenshot einer Automatisierungssapplikation für Turboladerprüfung

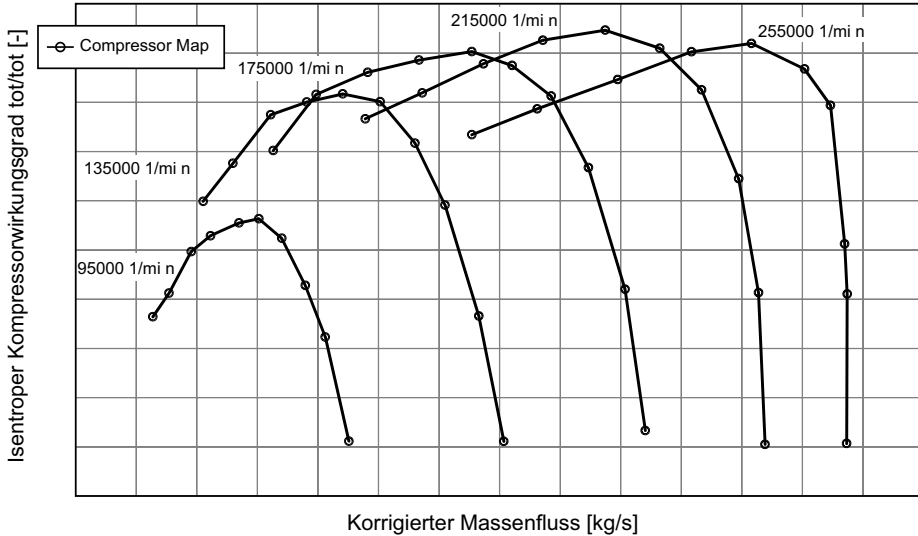
### Funktionsprüfung

Hier werden Kennfelder ermittelt. Der hierzu notwendige Laderbetrieb wurde im Vorfeld bereits beschrieben (siehe auch Seite 33). Benötigt werden stationär stabilisierte Massenströme, konstante Temperaturen und Drehzahlen sowie ein gleichbleibender Druck.

Ein Laderkennfeld wird basierend auf verschiedenen Kennzahlen gemessen, wobei die Bezugsgröße immer die Drehzahl ist. Für jedes Kennfeld werden zwischen 6 und 12 Drehzahllinien über dem Betriebsbereich des Laders verteilt festgelegt. Diese Drehzahlen werden mit Massenstromvariationen gefahren. Dadurch ergeben sich in Richtung geringerer Massenströme die Pumpgrenze (d. h. instabile, pumpende Strömung über den Verdichter) und bei maximalen Massenströmen die Stopfgrenze (Fördermengengrenze, die durch den Verdichter gefördert werden kann). Über den Verlauf dieser Linien werden die Prüfpunkte abstandsgleich über der Bogenlänge festgelegt.

Diese Punkte werden automatisch angefahren, wobei die physikalischen Zustände über gewisse Beharrungszeiten oder bis zum Erreichen spezifisch definierter Stabilitätsgrenzen gehalten werden. Im stabilisierten Zustand werden mehrere Messungen vorgenommen und die arithmetischen Mittelwerte zur Berechnung der Kennfeldpunkte herangezogen. Bei diesem Verfahren werden pro Drehzahllinie bis zu 12 Messpunkte gesetzt

(siehe Abb. 2-31). Mit der gleichen Vorgehensweise werden die Turbinenkennfeldpunkte ermittelt. Bevorzugt kann das Automatisierungssystem nahe beieinanderliegende Verdichter- und Turbinenpunkte zusammenfassen und gemeinsam abfahren.



**Abb. 2-31** Beispiel eines Verdichterkennfeldes, Wirkungsgrad über Durchsatz

Zur Erweiterung der Turbinenkennfelder können die Verdichterleistungspunkte mit zusätzlicher Prüftechnik variiert werden (Closed Compressor Loop System). Hier wird die Dichte des Arbeitsmediums des Verdichters erhöht (Druckerhöhung vor dem Verdichtereintritt), was bei gegebener Drehzahl dessen Leistungsaufnahme erhöht und so die Vermessung eines verbreiterten Turbinenkennfeldes erlaubt.

### ***Dauerlaufprüfungen***

Dauerlaufprüfungen stellen einen hohen Anspruch sowohl an den Prüfling als auch an den Prüfstand. Zum Teil sind über hunderte Stunden Massenstrom-, Drehzahl- und Temperaturrampen zu fahren.

Folgende Prüfläufe sind als Beispiele und ohne Anspruch auf Vollständigkeit genannt:

- **Bersttest (Burst Containment):** wird zum Nachweis der Bruchstabilität der Verdichtergehäuse im Fall einer Zerstörung des schnell rotierenden Verdichterläufers durchgeführt.
- **Hochtemperatur Kriechtest (High Temperature Creep):** dient zur Messung der Turbinentemperaturstabilität.
- **Thermoschock (Heiß-Kalt-Wechsel mit bis zu 250 K/s Bauteiletemperaturwechsel):** dient zur Feststellung der thermomechanischen Haltbarkeit der Turbinenteile. Hier werden auch gepaarte Ladergruppen über Umschaltteinrichtungen im Wechsel heiß-

kalt gefahren, was sowohl die Prüfstandslebensdauer erhöht (stationärer Brennerbetriebspunkt) als auch die steilsten Temperaturgradienten am Prüfling erlaubt (kleinste installierte thermische Trägheiten, da der Brenner nicht an der Temperaturänderung teilnimmt). Zusätzlich kann dadurch auch die statistische Losgröße pro Test erhöht (2 bis 8 Lader im gleichzeitigen Test) werden.

- Lastzyklen (Fatigue Cycles): werden zum Nachweis der Bauteilestabilität über transiente Laständerungen (Drehzahlvariationen) gefahren. So können insbesondere kritische Resonanzbereiche z. B. von Lagern oder Ähnlichem überprüft werden.
- Komponententests: sind z. B. Schliesszyklen von Wastegates- oder variablen Turbinen unter zyklisch wechselnden Druck- und Temperaturbedingungen.

### 2.2.3 Prüfstände für Getriebekomponenten

Bauteile und Komponenten eines Getriebes werden während der Entwicklung Betriebsfestigkeits- und Funktionserprobungen unterzogen. Die Validierung einzelner Baugruppen kann somit wie in Kapitel 1.2.1 ausgeführt isoliert betrachtet werden und hängt nicht von der Verfügbarkeit anderer Komponenten oder sogar des gesamten Antriebsstranges ab. Im Allgemeinen wird zwischen den Bauteilkomponenten- und dem Antriebsstrangkomponenten-Prüfstand unterschieden.

Einzelne Bauteilkomponenten (z. B. Zahnräder) werden in einem frühen Stadium auf speziellen Prüfständen erprobt. Die Bauteilkomponenten-Prüfung dient in erster Linie der Validierung der Materialwahl für die Getriebekomponenten und Schmierstoffe. Bauteilkomponenten-Prüfstände werden dediziert für einen Prüfling bzw. eine Entwicklungsaufgabe gebaut. Aufgrund der speziellen und zum Teil detaillierten Untersuchungen an den jeweiligen Bauteilkomponenten werden auch besondere Anforderungen an die Geräte am Prüfstand (z. B. Ölkonditioniersysteme, Aktuatorik usw.) gestellt.

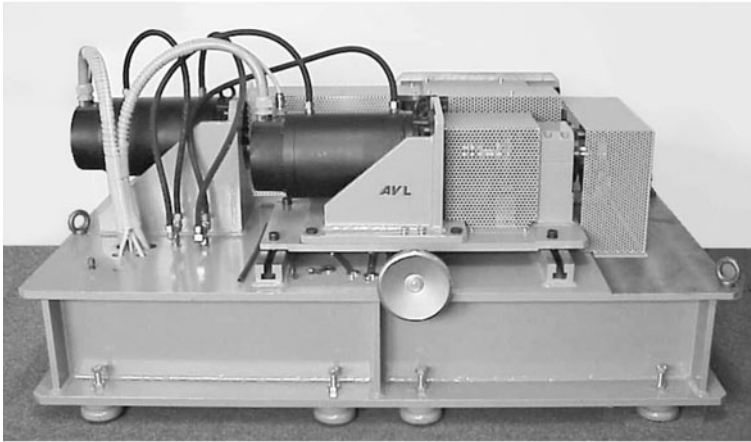
Beispiele für Bauteilkomponenten-Prüfstände sind:

- Dichtringprüfstände
- Schwenkprüfstände zur Untersuchung von Schmierstoffen
- CVT-Schubgliederbandprüfstände

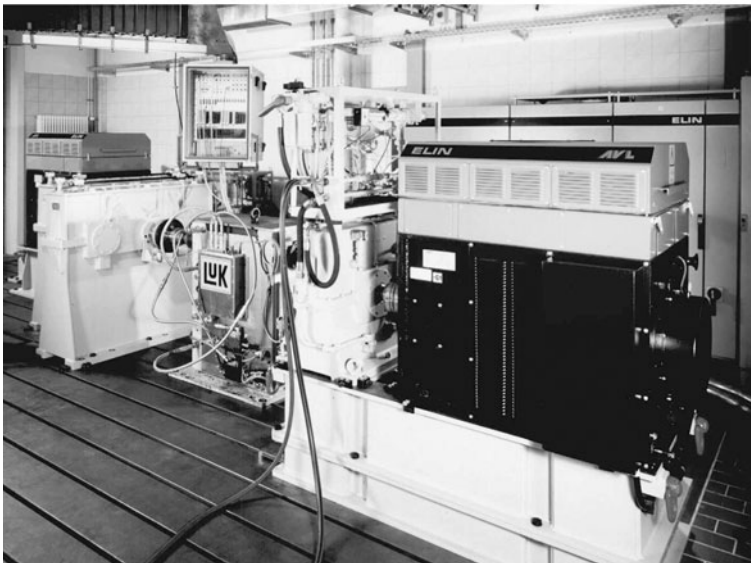
Antriebsstrang-Komponenten-Prüfstände erlauben die Erprobung gesamter Baugruppen. Je nach Entwicklungsaufgabe und Prüfling ergeben sich auch hier spezifische Anforderungen an Konditioniersysteme und Aktuatoren. Diese Prüfstände sind meist nicht nur reine Dauerlaufprüfstände, sondern werden auch für Funktionsuntersuchungen (z. B. Wirkungsgradmessung) genutzt. Beispiele für Antriebsstrang-Komponenten-Prüfstände sind:

- Schaltungsprüfstand zur Untersuchung der Schalt- und Synchronisationselemente
- Kupplungsprüfstand
- Zwei-Massen-Schwungrad-Prüfstand
- Wandlerprüfstand (siehe Abb. 2-33)

Komponentenprüfungen werden im Allgemeinen so einfach wie möglich gehalten, so dass innerhalb kürzester Zeit eine prinzipielle Aussage über Kenngrößen und/oder Betriebsfestigkeit der Komponente möglich ist.



**Abb. 2-32** CVT-Schubgliederbandprüfstand

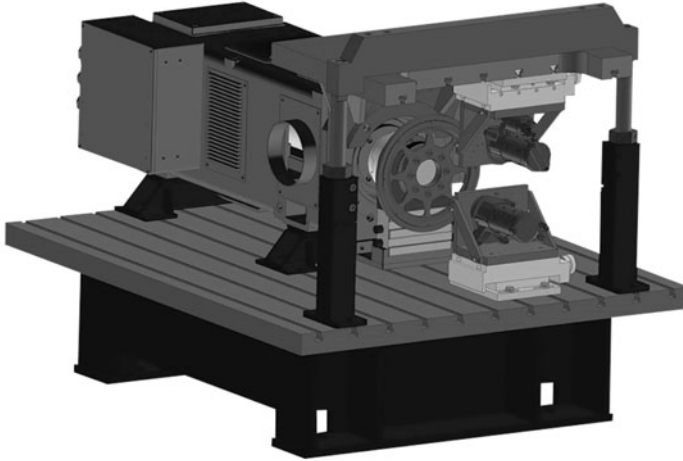


**Abb. 2-33** Wandlerprüfstand

#### 2.2.4 Startermotorenprüfstand

Startermotoren von Verbrennungskraftmaschinen werden üblicherweise am realen Verbrennungsmotor getestet. Zunehmende Belastung von Startermotoren durch die Verbreitung von Start-Stopp-Technologien in modernen Antriebsstrangkonzzepten, Kosten- und Zeitdruck der OEMs sowie mangelnde Verfügbarkeit der Verbrennungskraftmaschine zum Zeitpunkt der Startermotortests erfordern den Ersatz des Verbrennungsmotors als

Testumgebung durch eine modelbasierte Verbrennungsmotorsimulation und eine hochdynamische Permanentmagnet-Synchronmaschine als Belastungseinrichtung für den Startermotor.



**Abb. 2-34** Mechanischer Aufbau eines Starterprüfstandes

### **Mechanischer Aufbau**

Der wesentliche Aufbau der Prüfeinrichtung besteht aus einer permanent erregten Synchronmaschine (siehe Abb. 2-34), einem Drehmomentenmessflansch und dem Starterkranz, in den der konventionelle Start-Stopp-Starter einspurt. Der Aufbau ist dadurch relativ einfach und weist eine möglichst geringe Drehmasse auf, was die Systemdynamik in weiterer Folge positiv beeinflusst bzw. die maximal erforderliche Leistung des verwendeten Elektromotors deutlich senkt.

Da nur der reine Startvorgang versuchsrelevant ist (nicht jedoch der Motorhochlauf), kann der Versuch beendet werden, sobald der Starter wieder aus dem Starterkranz ausgespurt hat. Basierend auf dieser Tatsache kann ein Starter bis zu 20 Mal pro Minute getestet werden. Das innere thermische Verhalten eines Startermotors beschränkt jedoch die Prüfung auf eine Frequenz von maximal drei Starts pro Minute. Die daraus resultierende Stillstandszeit des Prüfstandes kann durch einen geeigneten Aufbau von vier unterschiedlichen Startern an einem Prüfstand und dem wechselweisen Test der einzelnen Starter minimiert werden.

### **Regelung der permanent erregten Synchronmaschine**

Die realistische Belastung des Startermotors in den ersten Millisekunden des Startvorganges ist in regelungstechnischer Hinsicht eine große Herausforderung. Naturgemäß summieren sich in einem aus industriellen Komponenten aufgebauten realen Regelkreis die Totzeiten in relevanten Größenordnungen. Betrachtet man das belastende Moment des Verbrennungsmotors und die Batteriespannung als eine Eingangsgröße des Startermotors und den Startermotorstrom als Ausgangsgröße, so ist es leicht nachvollziehbar,



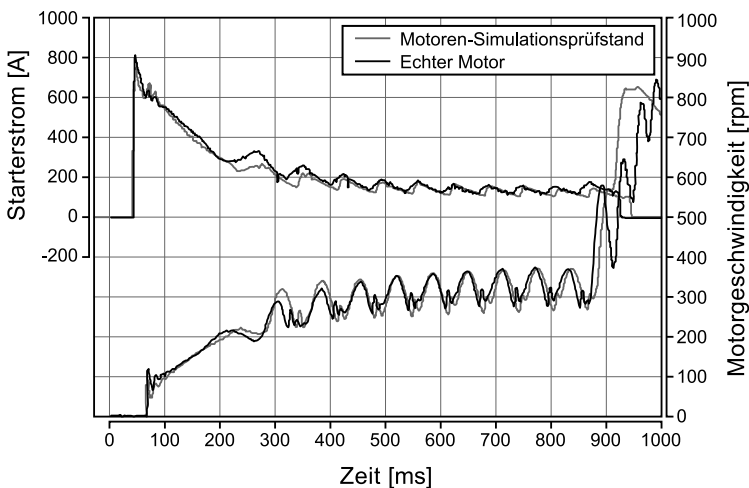
dass eine Verzögerung des Belastungsmomentes einen Einfluss auf den Startermotorstrom nach sich zieht. Dies entspricht dann nicht mehr einer Belastung, wie sie am realen Verbrennungsmotor zustande kommt.

Das bedeutet, dass sowohl mechanische Komponenten, wie z. B. der Planetensatz im Startermotor, als auch elektrische Komponenten, wie z. B. Bürsten und Kollektor, falsch belastet werden, wodurch Dauerlaufergebnisse verfälscht werden.

Es ist somit Ziel, die Belastungseinheit möglichst totzeitfrei aufzubauen bzw. geeignete Regelalgorithmen zur Verringerung der Totzeiteffekte einzusetzen. Die Totzeit in diesem System liegt in der Größenordnung von 2 bis 3 Millisekunden. Dies erscheint zwar nicht viel, der Startermotor bewegt sich unter der Berücksichtigung der elektrischen Komponente allerdings in einer relevanten Größenordnung.

## Resultate

Abb. 2-35 zeigt eine Gegenüberstellung von Startvorgängen am Motorsimulationsprüfstand und am realen Verbrennungsmotor. Sowohl der Stromverlauf des Startermotors als auch die Drehzahl des Verbrennungsmotors bzw. des Startermotors zeigen eine gute Übereinstimmung. Dazu ist eine ausgefeilte Regelungstechnik erforderlich, die in den Kapiteln 4.5.1 und 4.5.2 erläutert wird.



**Abb. 2-35** Gegenüberstellung Prüfstand – realer Verbrennungsmotor

### 2.2.5 Elektromotorenprüfstand

Die in diesem Abschnitt betrachteten Elektromotorenprüfstände sind zur Prüfung und Charakterisierung von Elektromotoren sowie deren Invertern konzipiert, welche in Antriebssträngen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingesetzt werden. Dies sind riemengetriebene Startergeneratoren, integrierte Startergeneratoren und Traktionsmotoren.

Elektromotorenprüfstände dienen zu selektiven Funktions-, Leistungs-, bzw. Dauerhaltbarkeitstests dieser Komponenten unter realitätsnahen und einfach reproduzierbaren Prüfbedingungen. Der selektive und realitätsnahe Test ermöglicht die Entwicklung und Optimierung dieser elektrischen Zusatzkomponenten parallel zur Entwicklung der übrigen Antriebsstrangkomponenten sowie die Sicherstellung der ordnungsgemäßen Produktfunktion vor Einbau der Komponenten in den Antriebsstrang.

Die beiden wesentlichen elektrischen Komponenten in Antriebssträngen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen sind:

- Elektromotor flüssigkeitsgekühlt, wenige Modelle sind luftgekühlt
- Inverter flüssigkeitsgekühlt, wenige Modelle sind luftgekühlt

### **Aufbau**

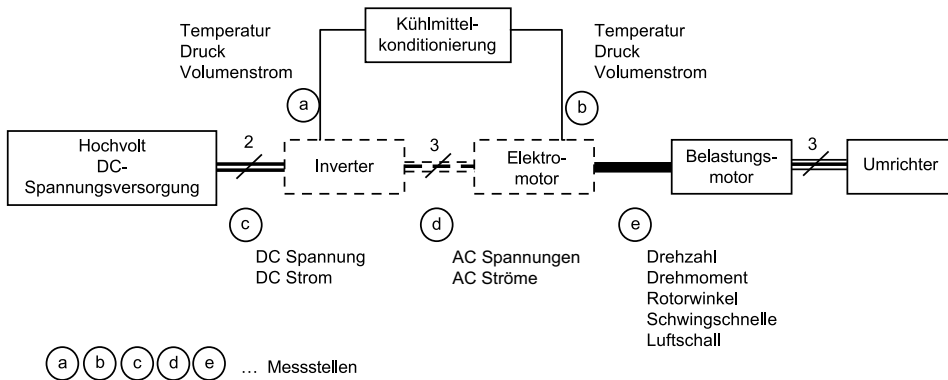
Zum Test dieser Komponenten ist eine Prüfstandsanordnung erforderlich, welche die folgenden Aufgaben übernehmen kann:

- Kühlmittelkonditionierung (Wasser, Wasser/Glykol, Öl) mit einstellbaren und regelbaren Parametern (Temperatur, Volumenstrom und Druck).
- Hochvolt-DC-Spannungsversorgung für Inverter, rückspeisefähig, mit einstellbaren und regelbaren Parametern (Spannung, Strom und Leistung)
- Elektrischer Belastungsmotor, asynchron oder synchron, Vierquadrantenbetrieb, mit einstellbaren und regelbaren Parametern (Drehzahl, Drehmoment und Rotorwinkel)
- Messung von Temperatur, Volumenstrom und Druck des Kühlmediums (gegebenenfalls auch im Rücklauf)
- Hochfrequente Messung von DC-Spannung und DC-Strom an den DC-Anschlussklemmen des Inverters (DC ist die englische Abkürzung für Gleichstrom (Direct Current))
- Hochfrequente Messung von AC-Phasenspannungen und AC-Phasenströmen zwischen Inverter und Elektromotor (AC ist die englische Abkürzung für Wechselstrom Alternating Current))
- Messung von Drehzahl, Drehmoment und Rotorwinkel an der Elektromotorwelle
- Drehzahlregelung des elektrischen Belastungsmotors mit Drehzahl- und Drehmomentmessung
- Gegen Prüfstandsgebäude schwingungsentkoppelte Aufspannvorrichtung für Elektromotor und elektrischem Belastungsmotor
- Wellenkopplung zwischen Elektromotor und elektrischem Belastungsmotor, drehsteif
- Wellenblockiereinrichtung als optionale Erweiterung für Kurzschlussstromprüfung
- Temperaturprüfkammer bzw. Klimaprüfkammer als optionale Erweiterung für speziell im Dauerhaltbarkeitstest erforderliche Hoch-/Tieftemperaturprüfung bzw. Klimaprüfung

### **Anwendungen**

Mit Prüfständen dieser Art lassen sich alle mechanischen (z. B. Drehmomentkennlinie, Schwingungen, Geräusche, Wuchtgüte), elektrischen (z. B. DC-Betriebsspannungsbereich, Kurzschlussstrom, Nenn- und Überlastpunkte, Leerlaufspannung) und thermi-

schen Eigenschaften (thermische Rotor- und Statorzeitkonstante) ermitteln. Zusätzlich können technische Daten für die Entwicklung und Bewertung der Komponentenkühlung sowie die Überlastbarkeit (z. B. der Leistungsfaktor, die elektrische- und mechanische Leistung und somit die Überlastbarkeit des Wirkungsgrades), die Drehmomentkennlinie, die Geräuschemissionen und die Axial- und Radialschwingungen erhoben werden.



**Abb. 2-36** Strukturbild eines Elektromotorenprüfstandes

### Prüfstandsanforderungen

Die Leistung und der Funktionsbereich der Prüfstandskomponenten werden auf das Prüflingsportfolio abgestimmt. Dynamische Prüfaufgaben, d. h. das Nachfahren sich zeitlich schnell ändernder Sollwerte, erfordern eine entsprechende kurzzeitige Überlastbarkeit bzw. Überdimensionierung dieser Prüfstandskomponenten zur Kompensation von Massenträgheiten und Wärmespeicherkapazitäten. Im Falle eines Prüflingsportfolios mit weit auseinanderliegenden Leistungsdaten ist zu prüfen, ob die für alle Prüflinge erforderliche Genauigkeit und Dynamik mit einem Prüfstand erreichbar ist.

Einfach fertigbare Adaptiervorrichtungen dienen dem raschen und fehlerfreien Anschluss unterschiedlicher Prüflinge an den Prüfstand.

Instrumentierung und Funktionalität werden auf den Einsatzzweck abgestimmt. Prüfstände, die im Bereich der Forschung eingesetzt werden, müssen an unterschiedliche Prüfaufgaben einfach anpassbar sein. Dauerlaufprüfstände benötigen eine Klimaprüfkammer, die Umgebungstemperaturen von  $-40\text{ °C}$  bis  $+150\text{ °C}$  und Luftfeuchten von 10 % bis 95 % relative Feuchte simulieren kann. In der Fertigungsendkontrolle eingesetzte Prüfstände müssen Prüflinge aufgrund von Messergebnissen vollautomatisiert und reproduzierbar als „in Ordnung“, „nicht in Ordnung“ klassifizieren können.

### Auslegungshinweise

- Notwendig ist ein elektrischer Belastungsmotor mit idealerweise geringer Drehmomentwelligkeit sowie hoher Drehzahlregelgüte im gesamten Drehzahlbereich vom Stillstand bis zur maximalen Drehzahl in positiver und negativer Drehrichtung.

- Erforderlich ist eine hochgenaue und schnelle Sensorik für die Eingangs- und Ausgangsgrößen des Inverters. Die Messung von Gleichspannung und Gleichstrom an den DC-Anschlussklemmen sowie die Phasenspannungen und Phasenströme an den Wechselstromanschlussklemmen müssen eine hohe Messgenauigkeit im Bereich [DC ... 5 kHz] aufweisen und die Inverterschaltfrequenz und deren Harmonische bis ca. 50 kHz erfassen können. Des Weiteren ist ein minimaler Zeitverzug zwischen Spannungs- und Stromabtastung sowie Messwertverarbeitung erforderlich. Nur so ist eine Verlustberechnung mit ausreichender Genauigkeit erzielbar.

### 2.2.6 Inverterprüfstand

#### Einleitung

Die Regelung elektrischer Antriebsmotoren im Automobil erfolgt durch Antriebsinverter, welche die erforderliche Leistungselektronik samt Signalelektronik und Software in einem Gerät vereinigen. Je nach Auslegung des Fahrzeuges sind dieser Baugruppe neben der Motorregelung noch weitere Funktionen zugeordnet, wie z. B. Batterieladen oder Energieausgleich zwischen dem Hochvolt- und dem Niederspannungssystem. Um solche Antriebsinverter zu prüfen, ist es insbesondere erforderlich die entsprechenden Systemkomponenten (oder Ersatzlasten) an die elektrischen Geräteschnittstellen anzuschließen. Besondere Anforderungen ergeben sich aus der Schnittstelle des Inverters zum Elektromotor, die typischerweise durch die Phasenausgänge und das Rotorlagesensor-Signal gebildet wird.

Als adäquate Testlast für diese Schnittstelle kann ein Elektromotor selbst in Erwägung gezogen werden, sofern dieser mit einem Belastungssystem (Belastungseinheiten – siehe S. 125) gekoppelt wird, um die entsprechende Last zu erzeugen. Bei solch einer Anordnung wird ein Elektromotorenprüfstand zur Prüfung des Inverters herangezogen. Als Inverterprüfstand unterliegt dieser Aufbau jedoch gewissen Einschränkungen, die sich von der Mechanik her ergeben. Eine Belastungseinheit bringt zusätzliche Massenträgheit ein, die kompensiert werden muss. Zusätzlich gibt es in der Regeldynamik Systemgrenzen. Bei kritischen Arbeitspunkten, wie z. B. Drehzahl Null oder der maximalen Last, kommt der Testaufbau an seine Grenzen. Hinzu kommen eingeschränkte Reproduzierbarkeit von Tests (Justage-Ungenauigkeiten) und die fehlende Möglichkeit, einfache Fehler im Motor zu stimulieren.

Wenn bei korrekter Nachbildung der elektrischen Ebene einer Elektromaschine die Mechanik der Elektromaschine simuliert wird, können diese Einschränkungen umgangen werden. Dieses Konzept liegt dem Elektromaschinenemulator zugrunde. Der Elektromaschinenemulator ist eine rein elektronische Nachbildung einer Elektromaschine, bei der ganz bewusst auf den realen Aufbau einer mechanischen Ebene verzichtet wird. Elektromaschinenemulatoren eröffnen dadurch neue Möglichkeiten in der Inverterprüfung. Ein Elektromaschinenemulator ersetzt an der elektrischen Anschlussebene des Prüflingsinverters den realen Elektromotor und bildet diese Signale hinsichtlich Strom und Spannung über alle vier Quadranten präzise in Echtzeit nach, wobei die Mechanik der Elektromaschine nur simuliert wird. Ebenfalls emuliert wird ein Rotorsensor, der die mechanische Position der Maschine an den Inverter meldet.

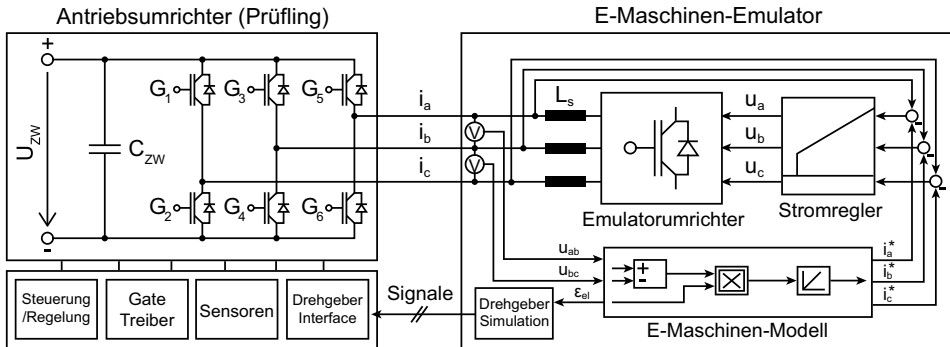


Abb. 2-37 Blockbild – Prüfaufbau Emulator mit Inverter

### Hohe Flexibilität bei hoher Dynamik

Das auffälligste Merkmal einer Emulatorlösung ist der kompakte Aufbau durch die fehlende „Mechanik“ und die sich daraus ergebende Flexibilität. Dies zeigt sich bereits bei der Wahl des Motors, mit dem der Umrichter getestet werden soll. Da dieser Motor nur virtuell als Softwaremodell existiert, kann er jederzeit ohne Umrüstung mit nur einem Mausklick ausgetauscht oder in seiner Charakteristik verändert werden. Aufgrund des Aufbaus ohne drehende Wellen erlaubt die Emulatorlösung Tests ohne jegliche mechanische Begrenzungen, wie z. B. Drehzahldynamik oder Verschleiß. Der Prüflingsinverter kann gefahrlos mit den umfangreichen Fehlerbildern einer Antriebsmaschine konfrontiert werden, wobei die Strombegrenzung im Emulator den Prüfling schützt.

Die Technologie der Elektromaschinenemulation ist eine „Bridging-Technologie“. Sie ist zwischen etablierter „Hardware-in-the-Loop“-Technologie (siehe auch Seite 53) und der Dynometertechnologie (siehe auch Seite 125) einzureihen. Für die Inverterentwicklung kommen heute verschiedene „In-the-Loop“-Verfahren, wie z. B. Model-in-the-Loop, Software-in-the-Loop oder Hardware-in-the-Loop, zum Einsatz. Beim letzteren Verfahren ist von Bedeutung, „wie viel“ Hardware der zu prüfenden Komponente real im Testaufbau verwendet wird (siehe auch Abb. 1-6 im Kapitel 1.2.1). Wird diese Technologie auf Leistungsinverter übertragen, waren bisher „Freischnitte“ in der Komponente erforderlich. Das bedeutet, dass die Leistungselektronik in konventionellen HiL-Prüfständen freigeschnitten wurde, d. h. sie wurde durch Modelle mit gleichen Interfaces und sehr ähnlichen Eigenschaften wie die realen Inverter ersetzt. Für die Komponentenprüfung in Anlehnung an die ISO 26262 ist solch ein Ansatz unbrauchbar, da der Prüfling nicht in seinem originalen Zustand vorliegt sondern „freigeschnitten“ wurde.

Beim Einsatz eines Elektromaschinenemulators sind keine Freischnitte mehr erforderlich. Das bedeutet, dass der Inverter in seinem originalen Zustand genau wie bei einem Prüfvorgang mit Lastmaschine betrieben wird und Prüfungen gemäß ISO 26262 inklusive der Darstellung beliebiger Fehlerbilder durchführbar werden. Von beiden Testverfahren – HiL- und Belastungseinheiten-Tests – werden dabei die Vorteile vereint: Die Elektromaschine existiert nur als Softwaremodell und trotzdem ist der volle elektrische Leistungsfluss gewährleistet. Nachteilig sind jedoch die höheren Kosten des Prüfstandes.

### Validierung des Testaufbaus

Beim Einsatz eines Elektromaschinenemulators kommt es ganz wesentlich darauf an, dass sich die elektrische Charakteristik an der Anschlussebene möglichst identisch zum realen Motor darstellt. Diese „Abbildungstreue“ ist von größter Bedeutung, da sich hieraus die Verwendbarkeit des Emulators für die unterschiedlichen Testapplikationen ableitet.

Charakteristisch für eine derartige „Power“-HiL-Anlage mit Elektromaschinenemulator ist die komfortable Arbeitsweise. Fehlerbilder in der Antriebsmaschine können einfach dargestellt werden, ohne die Nachteile der HiL-typischen Manipulation des Prüflings in Kauf nehmen zu müssen. Der Umrichter kann Serienstand haben und das Gerät muss nicht einmal geöffnet werden. Vollständige Umrichterprüfungen unter Berücksichtigung der ISO 26262 (Funktionale Sicherheit) werden somit auch für Antriebsinverter möglich.

### Typische Anwendungen

Bei Invertern werden unter Anderem folgende Testszenarios durchgeführt:

- Einstellung Rotorlagegeber
- Überprüfung der  $d/q$  Bestromung
- Prüfung Drehmomentregelung
- Prüfung Drehzahlregelung
- Prüfung Leistungsregelung
- Prüfung Rekuperation
- Prüfung kritischer Arbeitspunkte wie z. B. Anfahren am Bordstein
- Auslegung von Reglern zur aktiven Schwingungsdämpfung
- Prüfung des Monitoring (Stimulation von Elektromaschinenfehlern)
- Prüfung aktiver Kurzschluss
- Einsatz virtueller Elektromaschinen im Testloop
- Ringvergleiche von Invertern

### Gesamtsystem für Inverterprüfung

In einem Gesamtsystem zur Inverterprüfung werden neben dem Elektromaschinenemulator noch weitere Komponenten benötigt, um einen Antriebsinverter betreiben und aussagefähige Tests durchführen zu können. Über eine Sicherheitssteuerung wird der gefahrlose Betrieb solch einer Anlage sichergestellt (siehe Kapitel 4.7). Der Geräteschutz ist hier auch neben dem Personenschutz in einem Hochvoltssystem ein wichtiger Aspekt. Ein gesamter Systemaufbau für eine Hochvoltinverterprüfanlage setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Elektromaschinenemulator plus Leistungsverorgung
- Batterieemulator (DC-Versorgung des Prüflings) (siehe auch Kapitel 3.2.3)
- Prüflingsaufnahme
- Kühlwasserversorgung (Prüfling) (siehe auch Kapitel 3.2.4)
- Sicherheitssystem (siehe auch Kapitel 4.7)
- Testautomatisierung (siehe auch Kapitel 4.6.1)

Hinzu kommen je nach Anforderung und Prüfling noch Ergänzungen wie Klimakammer, Leistungsmesser, Niedervoltversorgung, Restbussimulation, DC-Lastsenke. Die nachstehende Abbildung zeigt einen typischen Inverterprüfstand.



**Abb. 2-38** Typischer Inverterprüfstand für den Hochvoltantriebsstrang

### 2.2.7 Batterieprüfstand

Batterien sind das Herzstück des elektrifizierten Antriebsstrangs. Demzufolge kommt ihrem Test und ihrer Validierung eine große Bedeutung zu. Generell handelt es sich bei Batterien um elektrochemische Energiespeicher, weshalb Batterieprüfstände auch zum Test von ähnlichen Prüflingen, wie etwa Ultra- bzw. Supercapacitors geeignet sein sollten. Im Bereich der (wiederaufladbaren) Batterien müssen mehrere Arten von elektrochemischen Energiespeichern beherrscht werden. Im Automobilbereich dominieren derzeit Blei-, Nickelmetallhydrid- und vor allem Lithiumionenbatterien den Markt.

Im Folgenden soll deshalb exemplarisch auf die Anforderungen der Tests von Lithiumionenbatterien näher eingegangen werden.

Bei der Validierung und beim Test von Lithiumionenbatterien ist prinzipiell zwischen dem Test von einzelnen Zellen, Modulen und kompletten Batteriesystemen zu unterscheiden. Vom Test der einzelnen Zelle bis hin zum Batteriesystem steigen die Anforderungen an das notwendige Spannungsniveau und die bereitzustellende Leistung am Prüfstand sowie an die Komplexität der Prüfaufgabe. Einen Überblick hierzu gibt Tab. 2-1. Die Tests werden in speziellen Temperatur- bzw. Klimaschränken durchgeführt. Der Überwachung von Temperatur, Strom und Spannung kommt dabei eine wichtige Aufgabe zu. Zur Überwachung der Temperatur kann, speziell während der Entwicklungsphase von Batterien, zusätzlich die Verwendung von Infrarot(IR)-Kameras sinnvoll sein.

**Tab. 2-1** Überblick über typische Anforderungen an Zell-, Modul- und Batteriesystemtests

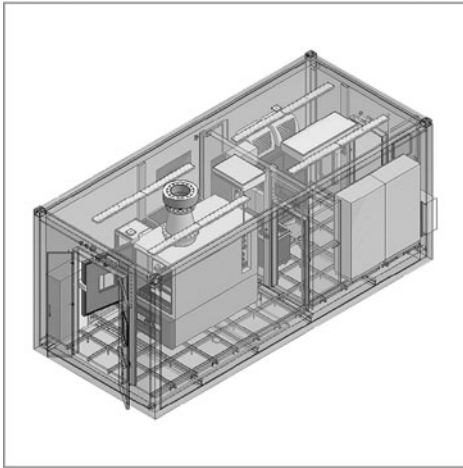
<b>Prüfling</b>	<b>Typischer Leistungsbereich</b>	<b>Besondere Randbedingungen</b>
Zelle	Bis 6 V 50–400 A	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Reine Temperaturtests</li> <li>– Zusätzliche Temperatursensoren</li> </ul>
Module	bis 60 V 50–600 A	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Temperatur- und Klimatests</li> <li>– Gegebenenfall Einbindung und Monitoring der einfachen Modulüberwachungselektronik</li> <li>– Gegebenenfall externe Kühlung</li> <li>– Zusätzliche Temperatur- und Spannungssensoren</li> </ul>
Batteriesystem	bis 400 V, teilweise bis 1000 V bis 250 kW	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Temperatur- und Klimatests</li> <li>– Einbindung und Monitoring des Batteriemanagementsystems</li> <li>– Externe Kühlung</li> <li>– Gegebenenfall Restbussimulation</li> <li>– Zusätzliche Temperatur- und Spannungssensoren</li> </ul>

Bei der Durchführung der Tests steht die Sicherheit an oberster Stelle, da es im Schadensfall auch zur Explosion der Zellen kommen kann, sei es durch eine defekte Zelle oder Überladung/Überspannung. Aus diesem Grund muss dafür gesorgt werden, dass es zu keinem explosionsfähigen Gemisch in der Testkammer kommen kann (z. B. durch Testen unter Inertgasatmosphäre). Zudem empfehlen sich die Überwachung der Gasatmosphäre nach brennbaren Gasen und die Installation einer Brandbekämpfungsanlage, wie etwa einer Wassernebel- oder Kohlendioxid-Löschanlage.

Die durchzuführenden Tests hängen von der geplanten Absicherung ab. Üblicherweise werden anwendungsnahe Strom-/Spannungsprofile unter verschiedenen äußeren Temperaturen und gegebenenfalls variiert Luftfeuchtigkeit abgefahren. Zudem werden zur besseren Vergleichbarkeit auch standardisierte Tests durchgeführt, wie etwa in den Normen und Standards ISO 12405 und ISO 62660 oder auch von anderen Instituten wie SAE, Freedom-CAR, UNECE oder VDA vorgeschlagen. Zusätzlich werden häufig beschleunigte Alterungsversuche unter erhöhten Temperaturen aber ohne elektrischen Betrieb durchgeführt. Solcherart gealterte Zellen und Batterien werden regelmäßig auf Kapazitätsverlust und Innenwiderstandsanstieg überprüft.

Für die Durchführung aller dieser Tests ist es von Vorteil, ein Automatisierungssystem einzusetzen. Dies dient zum einen einer schnellen Programmierung der Testsequenzen und automatisierten Auswertung der Testläufe, aber auch der Sicherheit, da Warn- und Abschaltsschwellen (wie Zelleneinzelspannung oder max./min. Temperaturen) einfach integriert werden können. In Abb. 2-39 ist der typische Prüfraumaufbau zu sehen, bestehend aus einem Container, der die Klimakammer, die Leistungselektronik, den Bedienraum sowie die Kühl- und Sicherheitseinrichtung umfasst.





**Links oben:** Schematische Ansicht des Prüfcontainers mit Klimakammer, Leistungselektronik, Bedienraum sowie Kühl- und Sicherheitseinrichtung

**Rechts oben:** Fotografie des realen Containers mit Blick auf die Klimakammer

**Links unten:** Schrank mit Leistungselektronik

**Abb. 2-39** Typischer Aufbau zur Durchführung von Batterietests

Neben den hier beschriebenen elektrischen und thermischen Performance- und Validierungstests sind die Zellen und Batterien zusätzlich hinsichtlich verschiedener Umgebungsbedingungen, mechanischer Festigkeit und Sicherheit zu untersuchen. Die genauen Testbedingungen hierfür sind ebenfalls in den oben genannten Normen zu finden.

### 2.2.8 Brennstoffzellenprüfstand

Die Brennstoffzellentechnik (siehe auch [3]) ermöglicht die Erzeugung von elektrischer Energie (und Wärme) bei hohem Wirkungsgrad und schadstofffrei im Fall der mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen (z. B. der Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle – PEMFC) oder bei niedrigsten Schadstoffemissionen bei Verwendung von Hochtempera-

tur-Festoxid-Brennstoffzelle (engl. SOFC). Diese SOFC Brennstoffzelle ist für den Erdgasbetrieb aber auch für den Betrieb mit Reformgasen (es wird auch Synthesegas genannt) ausgelegt und für den Betrieb mit Diesel, Benzin, Erdgas oder Methanol geeignet.

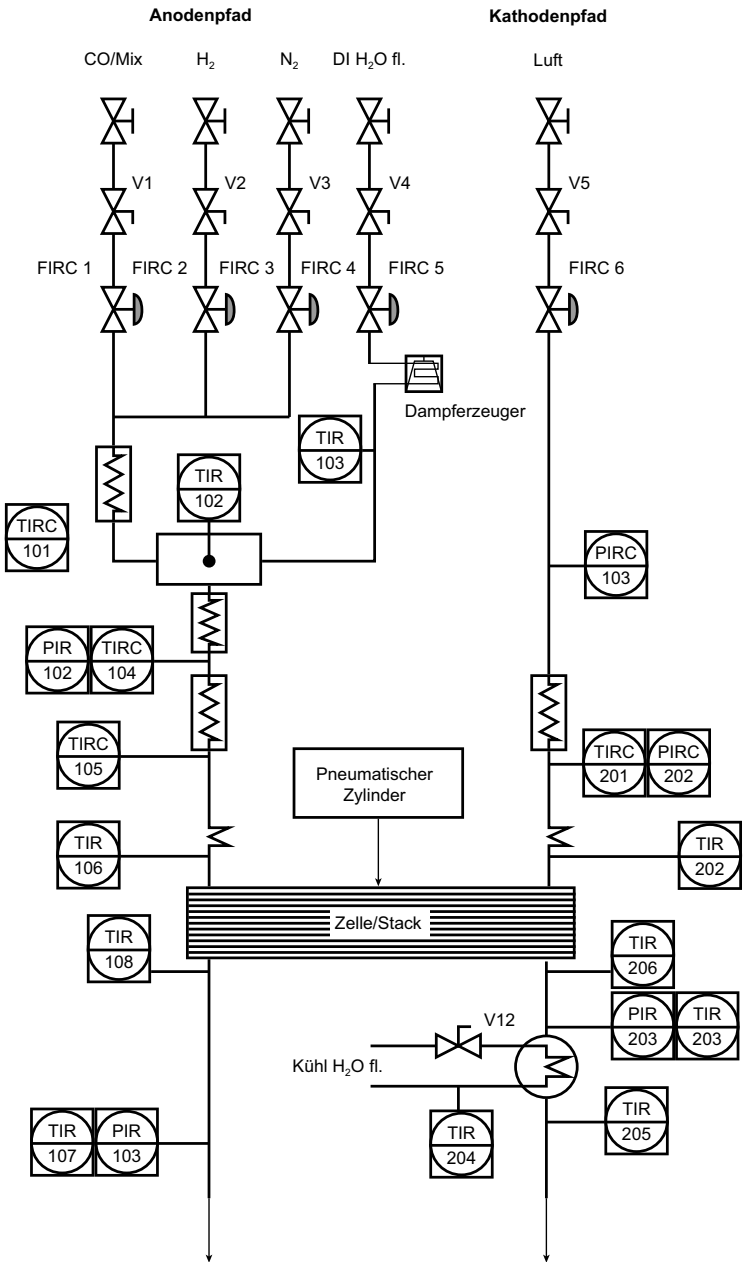


Abb. 2-40 Anoden- und Kathodenpfad eines Brennstoffzellenprüfstandes

Brennstoffzellenprüfstände bestehen prinzipiell aus zwei unabhängigen Gaspfaden. Ein Kathodenpfad dient zur Bereitstellung der Oxidantien (Luft oder Sauerstoff) und Stickstoff bzw. Gemischen dieser Gase. Mittels des Anodenpfads werden die gasförmigen Kraftstoffe wie Wasserstoff, Methan und CO zur Anodenseite der Brennstoffzelle geführt. Die Gase beider Pfade können unabhängig voneinander konditioniert werden, wobei je nach Typ der Brennstoffzelle Temperaturen und Drücke bis 150 °C (bei PEMFC) bzw. 800 °C (bei SOFC) sowie bis zu 5 bar (rel.) erforderlich sind. Es besteht auch die Möglichkeit, den beiden Gaspfaden unabhängig voneinander Wasserdampf oder Flüssigwasser beizumengen. Flüssige Kraftstoffe, wie z. B. Diesel oder Methanol, können mittels einer Dosierpumpe zudosiert werden.

Entsprechend dem allgemeinen Stand der Technik können auch diese Prüfstände mit einer Simulationsumgebung gekoppelt werden, wobei z. B. nur der Brennstoffzellenstack als reale Komponente (Hardware) existiert. Alle Aktuatoren am Prüfstand werden mittels eines Simulationsmodells zusammen mit Sensoren in einem geschlossenen Regelkreis betrieben – man spricht von einem HiL-Prüfstand (Hardware in the Loop). Grund für den Betrieb eines HiL- Prüfstands ist es, dass wesentliche Bestandteile eines Brennstoffzellensystems unter realen Einsatzbedingungen untersucht werden können, bevor diese Kombination aus Bauteilen real aufgebaut wird.

Wichtige Simulationsmodelle für einen HiL-Brennstoffzellenprüfstand sind:

- Modell für SOFC Stack
- Modell für PEMFC Stack
- Modell für Kraftstoffreformer (Erdgas, Diesel, Methanol)
- Modell für Nachbrenner
- Modell für Kompressor
- Modell für Wärmetauscher
- Modell für Rohrelemente
- Modell für Ventile

Eine automatisierbare elektronische Elektrolast erlaubt sowohl einen manuellen Betrieb als auch einen automatischen Betrieb, bei dem beliebig vordefinierte Lastprofile abgefahren werden können. Dabei ist ein leistungs-, spannungs-, oder stromgeführter Betrieb der Brennstoffzelle möglich.

## **2.3 Steuergeräte-Prüfstände (HiL)**

### **2.3.1 Einführung**

Steuergeräte-Prüfstände stellen einen wichtigen Baustein der Qualitätssicherung bei der Entwicklung elektronischer Steuergeräte dar. Für diese Testumgebung wurde hauptsächlich der Begriff Hardware-in-the-Loop (HiL) geprägt, da der Prüfling (hier das Steuergerät) in eine simulierte Umgebung eingebunden wird. Dies gilt allerdings auch für alle anderen hier vorgestellten Prüfstandstypen, sodass wir im Folgenden zur richtigen Abgrenzung von Steuergeräte-Prüfständen sprechen.

Das vorrangige Ziel von Steuergeräte-Prüfständen ist es, Tests und Prüfprozeduren schon frühzeitig im Entwicklungszyklus eines Steuergerätes zu verankern. Die Laborumgebung bietet dabei im Gegensatz zum realen Fahrversuch reproduzierbare und automatisierbare Bedingungen. Damit lassen sich nach [4] folgende Anwendungsgebiete erschließen:

- Automatische Datenstands- und Softwarevalidierungen von Steuergeräten
- Überprüfung des dynamischen Verhaltens der Steuerungs-, Regelungs- und Diagnosefunktion eines Steuergerätes
- Einfache Prüfung der Softwarefunktionen unter extremen Bedingungen über die simulierte Vorgabe von Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte oder Luftdruck
- Nachstellen von extremen Fahrsituationen ohne Gefährdung von Testfahrern oder Prototypenfahrzeugen
- Vorgabe von Alterungs- und Ausfallsituationen von Sollwertgebern, Sensoren, Aktuatoren oder Kabelverbindungen
- Vorgabe von fehlerbehafteten oder unplausiblen Zuständen zur Überprüfung von Überwachungs- und Diagnosefunktionen

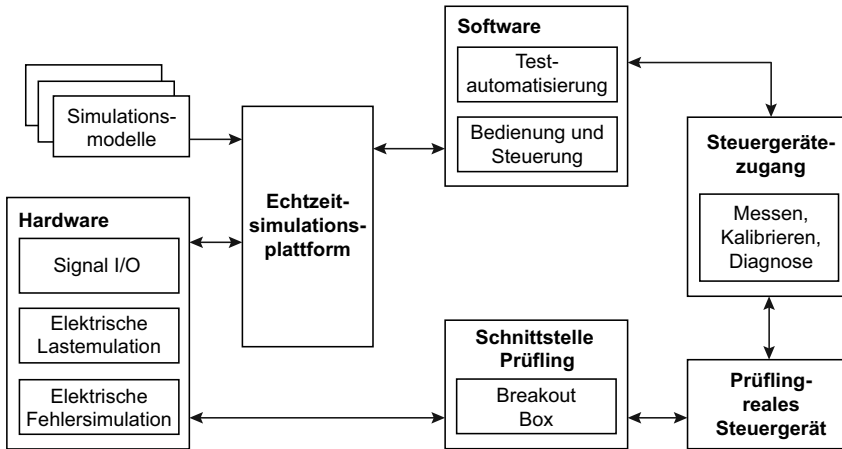
Steuergeräte-Prüfstände werden sowohl für den Test einzelner Steuergeräte als auch für den Verbundtest für ein ganzes Steuergerätenetzwerk eingesetzt. An Bedeutung gewinnt auch der Einsatz von Steuergeräte-Prüfständen in Kombination mit Prüfständen für Motor oder Antriebsstrang beispielsweise für die Kalibrierung von Steuergeräten (siehe Kapitel 2.3.6). Nach der Vorstellung eines allgemeinen Aufbaus eines Steuergeräteprüfstandes wird anschließend auf diese unterschiedlichen Anwendungen eingegangen.

### 2.3.2 Aufbau

Der prinzipielle Aufbau eines Steuergeräte-Prüfstandes ist in Abb. 2-41 dargestellt. Der Prüfling ist meist über eine sogenannte Breakout Box mit seinem Kabelbaum an die Hardware des Prüfstandes angeschlossen. An der Breakout Box können alle Signale hardwaretechnisch abgegriffen/ausgelesen werden.

Über die I/O-Hardwarekomponenten (siehe auch Kapitel 3.3) des Prüfstandes können Standardsignale wie beispielsweise analoge, digitale oder pulsweitenmodulierte (PWM) Signale erzeugt und gemessen werden. Des Weiteren werden spezielle I/O-Karten mit in Hardware realisierten Signalgeneratoren eingesetzt, beispielsweise um kurbelwellensynchrone Signale für Motorsteuergeräte oder Drehzahlsignale für Fahrdynamik- oder Getriebesteuergeräte zu erzeugen. Sollen elektrische Lasten nachgebildet und nicht real verbaut werden, so gibt es Lösungen zur elektrischen Lastemulation, um beispielsweise Einspritzdüsen elektrotechnisch nachzubilden.

Um die Diagnosen von modernen Steuergeräten zufriedenzustellen, sind teilweise spezielle Signalkonditionierungen mit realen Aktuatoren, sogenannten Echtlasten, notwendig. Über eine optional nachrüstbare elektrische Fehlersimulation können Kurzschlüsse nach Batteriespannung, nach Masse oder nach anderen Kanälen sowie Leitungsunterbrechungen oder erhöhte Innenwiderstände realisiert werden.



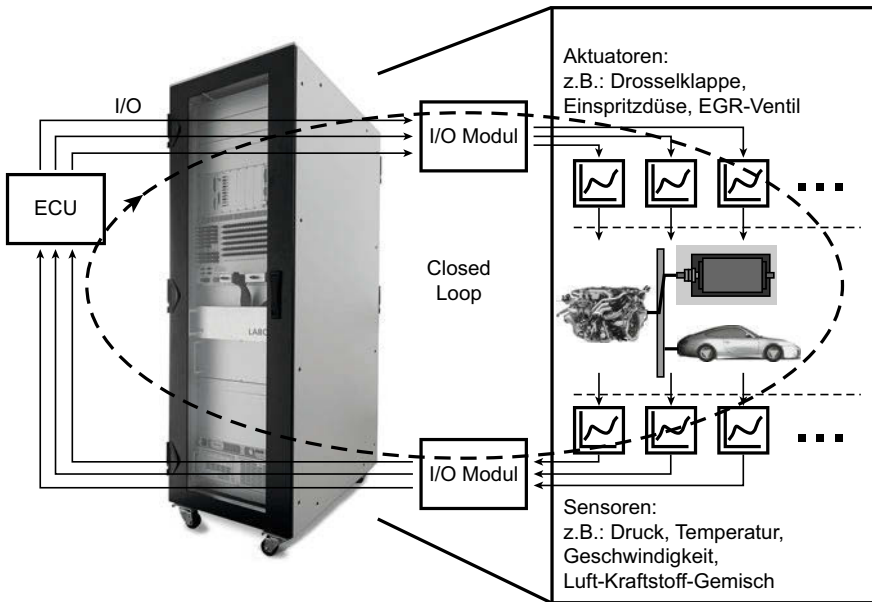
**Abb. 2-41** Prinzipieller Aufbau eines Steuergeräteprüfstandes nach [5] und [6]

Auf einer Echtzeitsimulationsplattform werden die notwendigen Simulationsmodelle zur Nachbildung der Steuergeräteumgebung ausgeführt. Dies betrifft sowohl physikalische Fahrzeugkomponentenmodelle als auch Modelle für Fahrer und Umgebung oder auch Komponenten für die Restbussimulation, um dem Prüfling alle notwendigen Signale zur Verfügung zu stellen. Aufgrund steigender Modellkomplexitäten werden mittlerweile für das echtzeitfähige Ausführen von Modellen oder für die Generierung von speziellen Signalen Mehrprozessorsysteme oder FPGA-Lösungen verwendet.

Die notwendigen Simulationsmodelle können auf unterschiedliche Art und Weise erstellt werden. Im Allgemeinen wird zwischen physikalischer und empirischer Modellbildung unterschieden, wobei eine Kombination der beiden Verfahren keinen Widerspruch, sondern sogar eine sinnvolle Ergänzung darstellt.

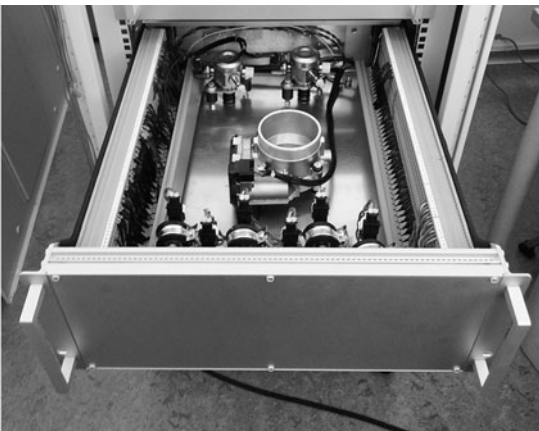
- Unter **physikalischer Modellbildung** versteht man die Anwendung von physikalischen Gesetzmäßigkeiten zur Ableitung der mathematischen Simulationsgleichungen. Dieses Vorgehen führt meist zu sogenannten White-box-models, da sowohl die internen Strukturen als auch die Bedeutung der Parameter offen liegen und eine physikalische Bedeutung haben.
- Im Gegensatz dazu verwendet man bei der **empirischen Modellbildung** Messdaten der Ein- und Ausgänge der zu modellierenden Systeme, um das Ein-/Ausgangsverhalten über mathematische Approximationsverfahren zu beschreiben. Die dabei entstehenden mathematischen Gleichungen und Parameter können nicht mehr physikalisch interpretiert werden. Diese Modelle werden auch Black-box-models genannt.

Speziell für komplexe physikalische Phänomene, welche sich derzeit nicht mit physikalischen Modellen in Echtzeit berechnen lassen, bzw. für unbekannte Zusammenhänge sind empirische Simulationsmodelle die logische Alternative. Ein Beispiel dafür ist die Simulation von Teilkomponenten eines Abgasnachbehandlungssystems bei einem Verbrennungsmotor oder die Abhängigkeit eines Batteriesystems von Umgebungsbedingungen wie Temperatur oder externer Belastung.



**Abb. 2-42** Realer Aufbau eines Steuergeräte-Prüfstandes

Der Prüfstand wird über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle bedient und gesteuert, welche typischerweise auf einem leistungsstarken Multicore PC läuft. Diese kann zusätzlich mit einer Testautomatisierung ausgestattet werden. Der Zugriff auf interne Größen des Prüflings erfolgt über Werkzeuge, die auch im Fahrzeug für das Messen, Kalibrieren und den Diagnosezugriff verwendet werden. Diese Softwarewerkzeuge sind meist zusätzlich zur Prüfstandssteuerung auf dem HiL-Prüfstands-PC installiert. Ein möglicher realer Aufbau ist in Abb. 2-42 zu sehen.



**Abb. 2-43** Lastschubladenkonzept zur Standardisierung eines HiL-Aufbaus

Für den Austausch von Projekten über die Grenzen der Simulator-Hersteller hinweg wird ein standardisierter Aufbau benötigt. Dieser beginnt bei einem einheitlichen Steckerkonzept für die physikalische Anbindung der Steuergeräte. Sie reicht von einer standardisierten Pin-Belegung für die logische Anbindung der Steuergeräte, über einheitlich anzuschließende Breakout-Boxen, bis hin zu einer einheitlichen Lastkonditionierung. Dies kann beispielsweise zu einem Lastschubladenkonzept nach Abb. 2-43 führen, das in die unterschiedlichen Simulatortypen verbaut werden kann. Ein Projektwechsel ist somit sehr schnell und prozesssicher möglich, da nur noch der Kabelbaum und die Lastschublade angeschlossen sowie das dazugehörige Projekt geladen werden muss.

### 2.3.3 Steuergeräte-Komponententest

Beim Komponententest werden einzelne Steuergeräte betrachtet. Es können vier größere Testbereiche unterschieden werden:

- Überprüfung der Verkabelung (Kabelbaum) mit Hilfe von Ein-/Ausgangstests („Open Loop“)
- Überprüfung der implementierten Regelungs- und Steuerungsfunktionen („Open-Loop“ und „Closed Loop“ ohne/mit Zugriff auf interne Steuergerätegrößen)
- Überprüfung der Diagnosefunktionen („Closed Loop“ mit Fehlerspeicherzugriff)
- Überprüfung der Buskommunikation (Restbussimulation mit Fehleraufprägung, siehe auch Kapitel 4.5.7)

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Testszenarien und die Begriffe „Open-Loop“ und „Closed-Loop“ eingegangen.

Im sogenannten **Open-Loop-Betrieb** wird das Steuergerät mit Hilfe von Signalvorgaben stimuliert. Dies können im statischen Fall fest vorgegebene Werte sein, um das Ein-/Ausgangsverhalten des Steuergerätes und damit den Kabelbaum zu überprüfen. Sind Messdaten von einem Fahrversuch vorhanden, so können diese dem Steuergerät vorgegeben und die Reaktion darauf überprüft werden. Mit Signalgeneratoren lassen sich synthetische Eingangssignale erzeugen. Meist werden diese Signale in physikalischen Größen vorgegeben, d. h. Temperaturen in °C bzw. K oder Momente in Nm.

Im Schritt Datenkonvertierung müssen diese dann auf die notwendigen elektrischen Größen (Spannungswerte, pulsweitenmodulierte Signale etc.) oder auf Bussignale angepasst werden. Sollen die Daten auch physikalisch erfasst werden, so müssen aus den elektrischen Steuergeräteausgängen wieder physikalische Größen erzeugt werden. Bei der Datenkonvertierung können auch weitere Sensorfehler emuliert werden, indem beispielsweise ein Offset oder eine Drift dem Signal überlagert werden.

Vorteil des Open-Loop-Betriebes sind die geringen Modellvoraussetzungen für den Prüfstandsbetrieb. Dennoch lassen sich schon viele potenzielle Fehler bei den implementierten Funktionen überprüfen. Beispiele dafür sind Diagnosefunktionen der I/O-Komponenten, I/O-Verhalten von physikalischen und elektrischen Größen oder Überprüfung von diversen Open-Loop-Steuerfunktionen im Steuergerät. Eine Beispielsanwendung ist eine Programmstands- und Datenstandsvalidierung (siehe Abb. 2-45).

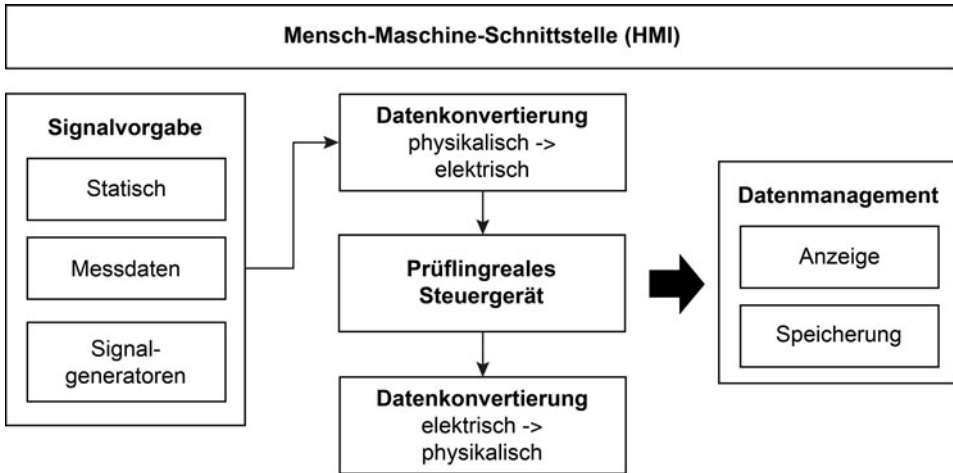


Abb. 2-44 Steuergeräte-Prüfstand im Open-Loop-Betrieb

Durch den Vergleich der Funktionalität einer alten und neuen xCU-Software bzw. deren Bedatung können Fehler vor der eigentlichen Inbetriebnahme im realen Versuchsträger aufgedeckt werden.

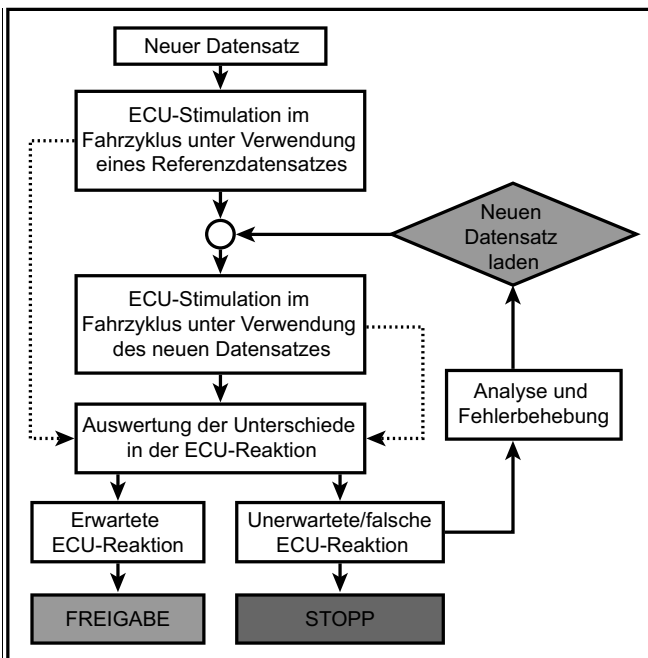
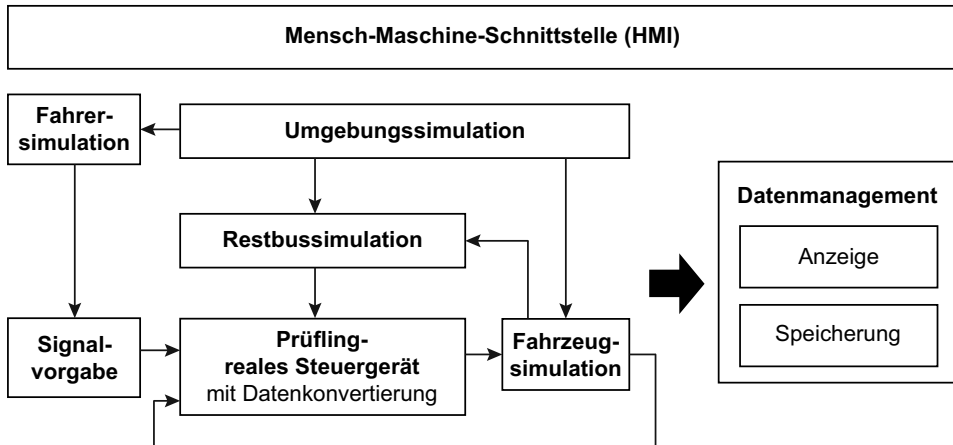


Abb. 2-45 Datenstandsvalidierung (vgl. auch [7])



Im Gegensatz zum Open-Loop-Betrieb benötigen Regelungsfunktionen die Rückmeldung der zu regelnden Strecke. Auch einige Diagnosefunktionen sind auf rückgeführte Signale angewiesen.

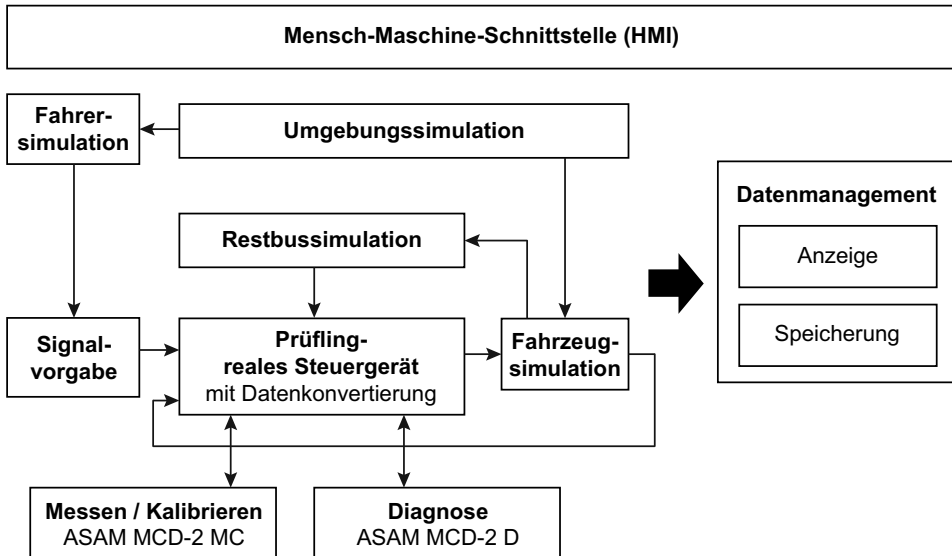
In diesem **Closed-Loop-Betrieb** wird die gesamte Umgebung des Steuergerätes nachgebildet. Neben dem eigentlichen Fahrzeugmodell sind dies auch die Umgebung und der Fahrer. Ist das Steuergerät über Bussysteme vernetzt, können die fehlenden Signale über eine Restbussimulation zur Verfügung gestellt werden. Bei der Nachbildung der Steuergeräteumgebung ist darauf zu achten, dass ein für das spezielle Steuergerät angepasstes Modell verwendet wird, das genau die Signale liefert, die der Prüfling für den Betrieb und Test benötigt. So verlangt ein Motorsteuergerät ein detailliertes Motormodell, kann aber auf eine ausgefeilte Nachbildung der Fahrdynamik verzichten. Im Gegensatz dazu benötigen Steuergeräte für fahrdynamische Regelungsfunktionen ein entsprechend detailliertes Fahrdynamikmodell, kann aber meist mit einer einfachen Nachbildung eines Motors betrieben werden (ein Spezialfall dazu ist das manöverbasierte Testen, das im Abschnitt 4.5.5 näher ausgeführt ist).



**Abb. 2-46** Steuergeräte-Prüfstand im Closed-Loop-Betrieb (vgl. auch [4])

Neben der Darstellung der Gutfunktionalität müssen die eingesetzten Modelle auch die Möglichkeit bieten, Fehler einspeisen zu können. Die erforderliche Genauigkeit der Simulationsmodelle hängt vom Anwendungsfall ab. Für viele Tests und Fehlerfälle ist eine qualitative Genauigkeit ausreichend. Geht es in Richtung Steuergerätekalibrierung am Prüfstand, so werden höhere Anforderungen an die Modellgüte gestellt.

Auch die Parametrierung der Modelle kann mit hohem Aufwand verbunden sein, da dafür Informationen von verschiedenen Fachabteilungen notwendig sind. Beim Closed-Loop-Betrieb ist daher immer Ertrag und Aufwand in Relation zu setzen. Für eine detaillierte Überprüfung von Regelungs- und Diagnosefunktionen sind auch Schnittstellen zum Lesen und Schreiben von internen Steuergrößen notwendig (siehe Abb. 2-47).



**Abb. 2-47** Steuergeräte-Prüfstand im Closed-Loop-Betrieb mit Zugriff auf interne Steuergerätegrößen

Die Schnittstellen sind über die Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems (kurz: ASAM, vgl. [8] und Kapitel 4.1.2) definiert und werden von verschiedenen Werkzeuganbietern unterstützt. Dabei wird in der ASAM MCD-2 MC die eigentliche Schnittstelle für ein Applikationssystem definiert, um interne Steuergerätegrößen zu messen bzw. zu verstellen („kalibrieren“). ASAM MCD 3 MC stellt darauf aufbauend bus- und protokollunabhängige Dienste eines Mess- und Applikationsservers für die Kommunikation zwischen Client-Applikationen und Steuergeräten zur Verfügung. Der Standard ASAM MCD 2 D (auch ODX genannt) ermöglicht den Zugriff auf Diagnosedaten ohne dass das externe Diagnosegerät speziell programmiert werden muss. ASAM MCD 3 D stellt eine Schnittstelle für einen Diagnoseserver zur Verfügung.

Mit dem Zugriff auf interne Steuergerätegrößen und insbesondere auf den Fehlerspeicher des Steuergerätes sind nun Testfälle im Closed-Loop-Betrieb möglich, indem über das Simulationsmodell Fehlerfälle und unplausible Zustände vorgegeben werden, die vom Steuergerät erkannt werden und zu einem Fehlerspeichereintrag führen müssen. Im Test wird überprüft, ob die erwarteten Fehlereinträge auch tatsächlich eintreten. Dies gilt vor allem für gesetzlich vorgegebene Diagnosefunktionen, wie z. B. die On-Board-Diagnose (OBD) bzw. European OBD (EOBD), über die alle abgasbeeinflussenden Systeme überwacht werden müssen. Die notwendigen Fehlerspeichereinträge sind in der ISO-Norm 15031-6 [9] festgelegt.

Die Überprüfung der Kommunikation über Bussysteme im Fahrzeug ist ein weiterer Testschwerpunkt, der vor allem bei der Integration von mehreren Steuergeräten im Verbundtest durchgeführt wird.

### 2.3.4 Steuergeräte-Verbundtest

Sind einzelne Steuergeräte für sich getestet, so folgt als nächster Schritt die Integration in ein Steuergerätenetzwerk. Dabei können zwei Anwendungsfälle betrachtet werden. Ein Testsystem kann eigens für den Integrationstest aufgebaut werden oder bestehende Steuergeräteprüfstände für den Komponententest können für den Verbundtest kombiniert werden. Dabei soll auch ein Rückbau mit geringen Rüstzeiten möglich sein. Voraussetzung dafür ist nach [10] insbesondere die Skalierbarkeit der Systeme. Dies betrifft zum einen die Erhöhung der Rechenleistung für Simulationsmodelle über Mehrprozessorsysteme, aber auch die Bereitstellung vieler Ein-/Ausgangskanäle in Mehrschranksystemen.

Besondere Bedeutung im Verbundtest kommt der Kommunikation der Steuergeräte untereinander zu. Auch hier ist neben dem Gutfall insbesondere das Aufprägen von Fehlern in der Kommunikation darzustellen, wie z. B. ungültige Botschaften, fehlerhafte Nutzdaten, Stresstests durch Erzeugen hoher Buslasten oder Störungen auf/in der Busphysik (vgl. [11]).

Neue Ansätze der Architektur für elektrische und elektronische Systeme (E/E-Architektur) führen zu einer Verteilung der Softwarefunktionalität auf mehrere Steuergeräte, um die Systemkomplexität auf Hardwareebene zu reduzieren. In diesen Fällen können logische Steuergerätefunktionen nur mehr im Verbundtest überprüft und abgenommen werden. Ein Beispiel dafür ist AUTOSAR (Automotive Open System Architecture) mit der damit einhergehenden Trennung von Basis- und Anwendungssoftware. Damit werden der Austausch und die Verteilung von Software auf verschiedene Steuergeräte ermöglicht. Somit können unterschiedliche Softwarekomponenten für ein Steuergerät von verschiedenen internen und externen Dienstleistern zugeliefert werden.

Ein weiterer Trend führt immer mehr zu übergeordneten Managementsystemen, wie sie im Nutzfahrzeugbereich schon lange vorhanden sind. Ein Beispiel hierfür ist ein Torque-Vectoring-Steuergerät. Immer komplexer werdende Fahrerassistenzsysteme oder Energiemanagementsysteme für Hybrid- oder Elektroantriebe sind weitere Beispiele. Für den Test dieser neuen E/E-Architekturen ist der Betrieb eines Steuergeräteverbundes am Prüfstand Voraussetzung.

Neben den internen Steuergerätenetzwerken gewinnt auch die Kommunikation nach außen zunehmend an Bedeutung. Schlagworte sind hier „vehicle-to-vehicle“ (V2V) für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und „vehicle-to-infrastructure“ (V2I) für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur, wie sie beispielsweise bei aktuellen Verkehrsinformationssystemen oder beim Mietwagenzugriff über Apps auf dem Smartphone notwendig ist. Hier werden zukünftig die Anforderungen an die Sicherheit dieser Schnittstellen die Entwicklung nach „außen“ wesentlich bestimmen. Auch für diese Anwendungen wird die Bedeutung von Steuergeräte-Verbundtests weiter steigen.

Oftmals übersteigt der Aufwand für den Aufbau und Betrieb eines reinen Steuergeräte-Verbundprüfstandes in einer virtuellen Umgebung den wirtschaftlichen Nutzen. Abhilfe kann die Kombination von realen Antriebsstrangprüfständen mit Verbund-HIL-Aufgaben schaffen, da somit die aufwändige Erstellung von Kabelbäumen und die Modellierung von Umgebungsmodellen entfallen oder zumindest stark reduziert werden können.

### 2.3.5 Testautomatisierung

Ein großer Vorteil der Steuergeräteprüfstände sowohl im Komponenten- als auch im Verbundtestbetrieb stellt die Möglichkeit dar, Tests und Prüfprozeduren zu automatisieren. Die Testautomatisierung ist vor dem Hintergrund der bestehenden Variantenvielfalt bei Steuergeräten ein entscheidender Faktor für die Qualitätssicherung. Eine grundlegende Voraussetzung für die Testautomatisierung sind standardisierte Schnittstellen für die Fernsteuerung aller Prüfstandskomponenten. Diese sind z. B. im ASAM-HiL (oder wie er in Zukunft genannt werden wird: ASAM-XiL) Standard (siehe Kapitel 4.1.2) definiert und sollen die Wiederverwendung von Testfällen auf unterschiedlichen Prüfsystemen erlauben.

Eine ausführliche Beschreibung von Aufbau und Funktionen einer Testautomatisierung, die grundsätzlich für alle Prüfstandskonfigurationen ähnlich ist, ist in Kapitel 4.6 zu finden.

### 2.3.6 Modellbasierte Kalibrierung

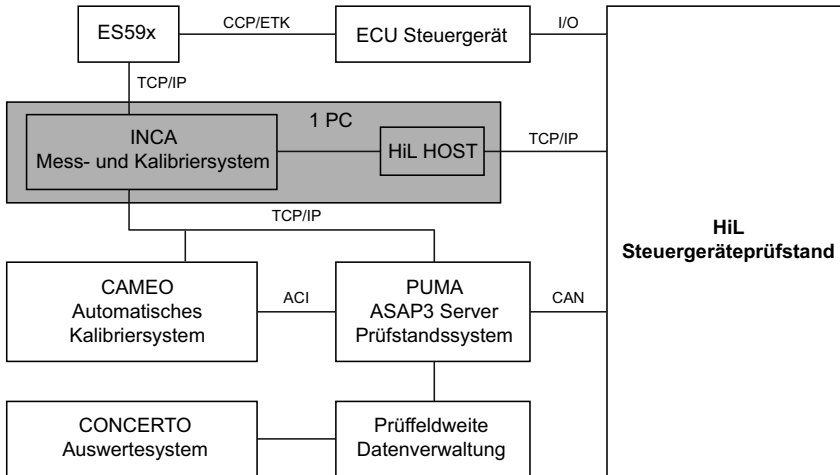
In den letzten Jahren hat sich eine neue Anwendung für Steuergeräteprüfstände entwickelt: die modellbasierte Kalibrierung. Sie unterstützt die Applikation von Serienfahrzeugen durch Hardware-in-the-Loop (HiL). Damit können Applikationsaufgaben schneller und kostengünstiger auf Steuergeräteprüfständen anstatt auf Verbrennungsmotorprüfständen oder Versuchsfahrzeugen durchgeführt werden. Voraussetzung dafür sind ausgereifte Modelle von Motor sowie Abgasnachbehandlungskomponenten, welche das Abgas- und Verbrennungsverhalten ausreichend genau darstellen können.

Das Verfahren ermöglicht ein Frontloading aber auch eine Parallelisierung in der Entwicklung, da Programmstände von Serienfahrzeugen bereits an HiL-Systemen validiert und vorab bedatet werden können, bevor Motoren und Versuchsfahrzeuge zur Verfügung stehen.

Um die HiL-Testumgebung effizient nutzen zu können, wird ein sogenanntes „virtuelles“ Prüffeld installiert. Der „virtuelle“ Prüfstand besteht aus dem gleichen Automatisierungs- und Applikationssystem, wie es am realen Prüfstand verwendet wird (Abb. 2-48). Damit können Testingenieure ohne neue Einschulung sowohl am Verbrennungsmotor- als auch am Steuergeräteprüfstand Bedatungen von Steuergeräten effizient durchführen.

Die Testläufe werden (wie am realen Prüfstand) mit der Automatisierungssoftware programmiert und anschließend ausgeführt. Das automatische Kalibriersystem kommuniziert mit dem Prüfstandssystem und dem Mess- und Kalibriersystem des Steuergerätes über Standard-Interfaces (siehe Kapitel 4.1.2).

Wie am realen Prüfstand schickt das Automatisierungssystem Stellmomente an die Belastungsmaschine, die ebenfalls durch ein Modell auf dem HiL-System simuliert wird. Von dort gehen die Ergebnisse des Motormodells, wie Drehmoment, Temperaturen, Drücke und Emissionen, sowie Verbrennungsskenngrößen (z. B. Spitzendruck, Verbrennungsschwerpunkt) zurück an das Prüfstandssystem. Alle Mess- und Simulationsergebnisse werden in der prüffeldweiten Datenverwaltung gespeichert.



**Abb. 2-48** Beispiel eines virtuellen Prüfstands zur modellbasierten Kalibrierung

Der Applikationsingenieur hat nun die Möglichkeit, die Messdaten mit seinem gewohnten Auswertesystem zu analysieren. Der virtuelle Prüfstand kann somit die komplette Werkzeugkette abdecken, was den größtmöglichen „Re-Use“ zwischen den Entwicklungsumgebungen gewährleistet und zu einer hohen Akzeptanz bei den Anwendern führt.

### Beispiele für Anwendungen am virtuellen Prüfstand

#### – **Modelbasierte (Vor-)Bedatung von Steuergerätefunktionen:**

Durch die Anwendung von hochgenauen Simulationsmodellen sowohl des Motors als auch des gesamten Antriebsstrangs können Teilfunktionen der Steuergeräte bereits am „virtuellen“ Prüfstand bedatet und überprüft werden. Vor allem in der Variantenapplikation (d. h. bei der Kalibrierung eines Motors, der in verschiedenen Fahrzeugen eingesetzt wird) ist die Erweiterung der Testumgebung auf ein HiL-System sehr hilfreich, um möglichst viele Fahrzustände kostengünstig überprüfen zu können. Hierzu zählen vor allem Umwelteinflüsse wie Höhe, Hitze, Kälte, die durch das Ändern der Umgebungsvariablen Temperatur und Druck sehr einfach in den Simulationsmodellen angepasst werden können, ohne dass der Versuchsträger sich tatsächlich in dieser Umgebung befindet. Dadurch werden Applikationsaufgaben im Steuergerät ermöglicht, wie die Bedatung von Korrekturfunktionen und der Komponentenschutz.

#### – **Überprüfung der modellbasierten Kalibrierergebnisse an kundenspezifischen Fahrzyklen:**

Auf Grund der immer größer werdenden Bedeutung von Real-Driving-Emissions (RDE) bietet der „virtuelle“ Prüfstand die Möglichkeit, diverse Fahrzyklen automatisiert abzufahren und so das Verhalten des Motors in jedem Fahrzustand zu überprüfen. So können Problemzonen frühzeitig aufgedeckt und behoben werden. Auch die Optimierung von Emissionen und Verbrauch als wichtigste Kriterien für den Kunden wird für den gesamten Betriebsbereich ermöglicht, ohne aufwändige Tests mit realen Versuchsträgern durchführen zu müssen.

– **Sensitivitätsuntersuchungen der modellbasierten Kalibrierergebnisse:**

Um sicherzustellen, dass Produktionstoleranzen von Sensoren und Aktuatoren zu keiner Beeinträchtigung der Funktionalität führen, müssen am Ende jedes Applikationsprozesses aufwändige Toleranzuntersuchungen durchgeführt werden. Hier unterstützt der HiL Simulator, indem die Sensor- und Aktuatorkennlinien in den Modellen vertrimmt werden und so die Reaktion der xCU überprüft werden kann.

Zusammenfassend kann also festgestellt werden, dass viele Applikationsaufgaben im heutigen Motorentwicklungsprozess mit einem HiL-Prüfstand unterstützt werden können. Die Vorteile liegen vor allem in der Simulation von verschiedenen Umwelteinflüssen, Bauteiltoleranzen und möglichen Funktions- und Verkabelungsfehlern. Auch die hohe Reproduzierbarkeit und die Unabhängigkeit von Bauteilschäden machen den „virtuellen“ Prüfstand zu einer effizienten Prüf- und Kalibrierumgebung für die Applikateure/Applikationsingenieure.

Trotzdem soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die modellbasierte Kalibrierung am HiL-Prüfstand auch Einschränkungen hat, zu denen vor allem Hardwareentwicklungen, Kaltstartoptimierung und Dauerlauffestigkeit zählen. Außerdem muss die finale Validierung sowie die Zertifizierung am realen Versuchsträger durchgeführt werden, da Simulationsmodelle im Allgemeinen immer Vereinfachungen beinhalten und somit die Wirklichkeit nicht hundertprozentig abbilden können. Ebenso sind die Anforderungen an die Genauigkeit der Simulationsmodelle wesentlich größer als bei konventionellen HiL-Systemen.

Nichtsdestotrotz können die HiL-Systeme im „virtuellen“ Prüffeld vorteilhaft für Serienapplikationsprojekte verwendet werden, da sie eine kostengünstige Möglichkeit zur Verfügung stellen, viele Kalibrieraufgaben vorab oder parallel zu den Standard-Prüfumgebungen wie Motorenprüfstand, Rolle und Straße durchzuführen. Dieses Frontloading der Kalibrierung in die HiL Simulation leistet einen Beitrag zu einer Qualitätssteigerung und einer Reduktion der Entwicklungszeiten. Weiterführende Hintergründe zur modellbasierten Kalibrierung können Abschnitt 4.6.3 entnommen werden.

## **2.4 Antriebsstrangprüfstände**

### **2.4.1 Antriebsstrangprüfstände mit Verbrennungsmotor**

Zunehmender Innovationsdruck und immer kürzere Entwicklungszeiten sind die großen Herausforderungen in der Antriebsstrangentwicklung. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind Parallelentwicklungen der verschiedenen Baugruppen ebenso erforderlich wie ein Testen des Antriebsstrangs in seiner Gesamtheit (siehe auch Kapitel 1.2.1).

Der Stellenwert der Antriebsstrangentwicklung in der Fahrzeugentwicklung ist in den letzten Jahren erheblich gestiegen. Signifikante Fortschritte in der Verbrauchs- und Emissionsentwicklung lassen sich heute nur noch mit einem optimierten Antriebsstrang erzielen. Somit sind Motorentwicklung und Antriebsstrangentwicklung wesentlich näher zusammengerückt.

Diese ganzheitliche Entwicklung wirkt sich auch auf die Antriebsstrangerprobung aus. In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt der Getriebeprüfung im Bereich der

Betriebsfestigkeitsuntersuchung des mechanischen Systems. Funktionsuntersuchungen, Kalibrierung der Steuergeräte, Fahrkomfort- und Schaltoptimierung sowie Missbrauchstests waren bis auf wenige Ausnahmen dem Fahrversuch vorbehalten. Die zunehmende Komplexität der Antriebsstrangkomponenten und deren Management sowie die Interaktion der verschiedenen Steuergeräte für Motor (ECU), Getriebe (TCU) und Hybridantrieb (HCU) mit intelligenten Fahrerassistenzsystemen (z. B. Stabilitätskontrolle ESP, etc) erfordern heute eine frühzeitige Validierung des Gesamtsystems auch ohne das Vorhandensein eines Prototypenfahrzeuges.

Moderne Antriebsstrangprüfstände sind als Multikonfigurationsprüfstände konzipiert. Multikonfiguration bedeutet zum einem, dass verschiedene Antriebsstrangkonfigurationen (siehe Abb. 2-49) mit einem Prüfstands Aufbau geprüft werden können. Zum anderen müssen auch unterschiedliche Antriebs- und Getriebekonzepte erprobt werden, z. B.

- Handschaltgetriebe (MT)
- Automatikgetriebe (AT)
- Doppelkupplungsgetriebe (DCT)
- Stufenlose Getriebe (CVT)
- Hybride Antriebsstrangkonzeppte

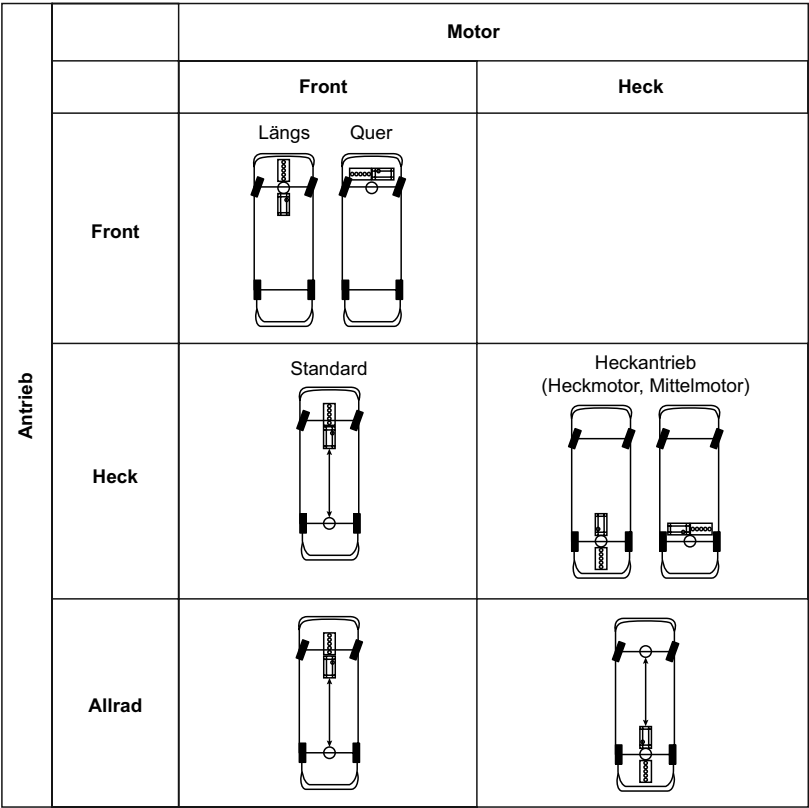
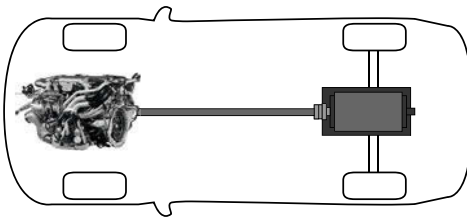


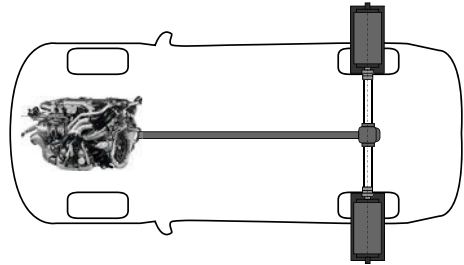
Abb. 2-49 Mögliche Antriebsstrangkonfigurationen

Der Variantentreiber für den Prüfstands Aufbau sind die zu erprobenden Antriebsstrangkonfigurationen. Im PKW-Bereich werden bis zu vier Maschinen zur Belastung des Antriebsstranges an den Rad- bzw. Kardanwellen eingesetzt. Typische Prüfstands aufbauten für einen Antriebsstrang in Standardkonfiguration (Frontmotor – Heckantrieb) sind in den Abb. 2-50 bis Abb. 2-53 dargestellt.

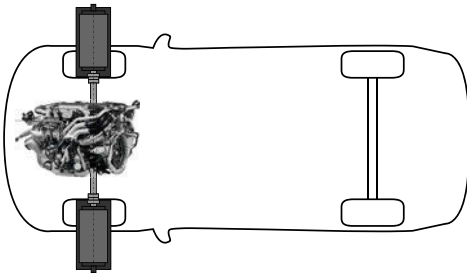
Der Prüfstands Aufbau nach Abb. 2-50 ist auf die Erprobung des Verbrennungsmotors und des Getriebes alleine ausgerichtet. Hierbei wird der Prüfling durch eine geeignete elektrische Maschine an der Kardanwelle belastet. Der Aufbau nach Abb. 2-51 erlaubt die Erprobung des Getriebes und des Hinterachsdifferenzialgetriebes. Abb. 2-52 zeigt den typischen Prüfstands Aufbau für Fahrzeuge mit Frontantrieb. Zur Erprobung von Allradantrieben eignet sich der in Abb. 2-53 gezeigte Prüfstands Aufbau mit vier Belastungsmaschinen.



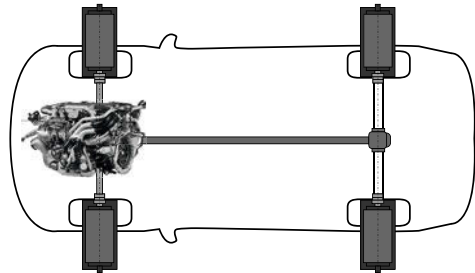
**Abb. 2-50** Powerpackprüfstand für Standardantrieb



**Abb. 2-51** Antriebsstrangprüfstand für Standardantrieb



**Abb. 2-52** Antriebsstrangprüfstand für Frontantrieb



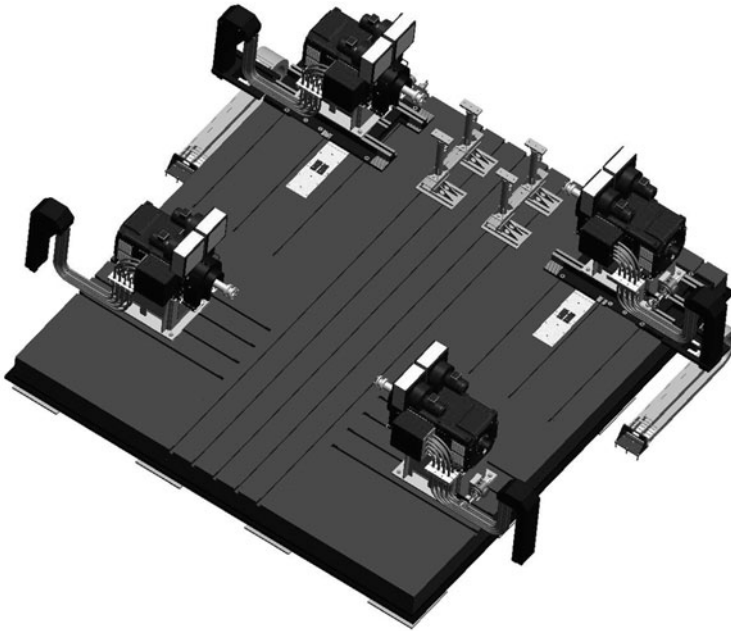
**Abb. 2-53** Antriebsstrangprüfstand für Allradantrieb

Allen Antriebsstrangprüfständen ist gemeinsam, dass der Prüfstands Aufbau flexibel an die verschiedenen Spurweiten und Achsabstände der einzelnen Fahrzeuge anpassbar sein muss. Hierfür werden die zwei bzw. vier Belastungsaggregate auf einem Zwischenrahmen aufgebaut. Im Allgemeinen ist die Arbeitshöhe, d. h. der Wellenmittelpunkt, fest.

Die axiale Verschiebung der Maschinen, d. h. die Einstellung der Spurweite, erfolgt in der Regel durch einen im Zwischenrahmen integrierten Verschiebemechanismus. Die Verstellung des Radstandes erfolgt vorzugsweise nur über die Radmaschinen der Hinter-



achse. Hierbei wird üblicherweise der Rahmen auf einer Aufspannplatte verschoben. Ein Spindelantrieb als Verschiebemechanismus ist in der Aufspannplatte integriert. Somit können üblicherweise Fahrzeuge mit einer Spurweite von 1300 mm bis 2000 mm und einem Radstand von 2200 mm bis 3200 mm geprüft werden. Zur Verbindung der Radmaschine mit der Seitenwelle des Prüflings werden spezielle für den jeweiligen Prüfling gefertigte Adapterflansche verwendet.



**Abb. 2-54** Beispiel eines Allrad-Antriebsstrangprüfstands

Die Wahl der Belastungsaggregate und des entsprechenden Drehmomentmessflansches wird von mehreren Faktoren beeinflusst:

- Antriebsstrangkonzept (Frontantrieb, Standardantrieb, Allradantrieb)
- Maximale Drehzahl des Antriebes (Verbrennungsmotor, Elektromotor, Hybridantrieb)
- Maximales Drehmoment des Antriebes (Verbrennungsmotor, Elektromotor, Hybridantrieb)
- Gesamtübersetzungsspreizung
- Drehmomentüberhöhung durch Kupplungen oder Drehmomentwandler
- Maximale Zugkraft am Rad
- Virtueller Fahrversuch auf unterschiedlichen Fahrbahnelagen (z. B. Schnee, Asphalt, etc.)

Typische Werte für das maximale Drehmoment pro Rad sind 1300 Nm bis 3500 Nm. Die maximale Raddrehzahl liegt üblicherweise im Bereich  $2400 \text{ min}^{-1}$  bis  $3000 \text{ min}^{-1}$ .

Der virtuelle Fahrversuch auf unterschiedlichen Fahrbahnbelägen erfordert trägheitsarme hochdynamische Radmaschinen, sodass das Eigenschwingungsverhalten des Antriebsstrangs am Prüfstand identisch zum Fahrversuch ist.

Für einen unbemannten automatisierten Betrieb integriert das Prüfstandsautomatisierungssystem unter anderem folgende Geräte:

- Getriebebeschalteneinrichtung zur mechanischen Betätigung der Schaltung (manuelles Getriebe, Automatikgetriebe, CVT-Getriebe, Doppelkupplungsgetriebe) und Fahrzeugkupplung bzw. Interface zu Steuergerät, mit dem ein Schaltvorgang ausgelöst werden kann (z.B. via CAN Botschaft)
- Kupplungsaktuator zur mechanischen Betätigung der Fahrzeugkupplung bzw. Interface zu Steuergerät, mit dem ein Kupplungsvorgang ausgelöst werden kann
- Fahrpedalbetätigung mechanisch mittels Aktuator bzw. Interface zu Steuergerät, mit dem ein Fahrpedalwert vorgegeben werden kann (z. B. via CAN Botschaft)
- Konditioniergeräte für verschiedene Medien (z. B. Kühlmittel, Motoröl, Getriebeöl, Verbrennungsluft, Kraftstoff, etc.)

Darüber hinaus müssen je nach Prüfaufgabe unterschiedliche Mess- und Überwachungsgeräte integriert werden. Hierzu zählen z. B.:

- Messsystem zur Schadenfrüherkennung, um bei Dauerläuferproben vor dem Eintreten der Zerstörung des Prüflings alle Systeme abstellen und eine Schadensanalyse durchführen zu können.
- Echtzeitklassierung zur Bestimmung des Lastkollektivs (siehe auch Abschnitt 4.7)
- Verbrauchs- und Abgasmessgeräte (siehe auch Abschnitt 3.3)
- Werkzeuge zur Kalibrierung von Motor- und Getriebesteuergeräten (siehe auch Abschnitt 4.6.3)
- Werkzeuge zum manöverbasierten Testen (siehe auch Abschnitt 4.5.5)

Insbesondere das manöverbasierte Testen liefert heute einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung eines effizienten Entwicklungsprozesses für moderne Antriebsstränge. Eine durchgängige Simulationsumgebung erlaubt hierbei die Bewertung und Optimierung des Fahrzeugs bzw. Antriebsstrangs und seine Interaktion mit der Umgebung in allen Phasen des Entwicklungsprozesses (siehe auch Abschnitt 1.2.1).

## **2.4.2 Antriebsstrangprüfstände mit Prime Mover als Eintrieb**

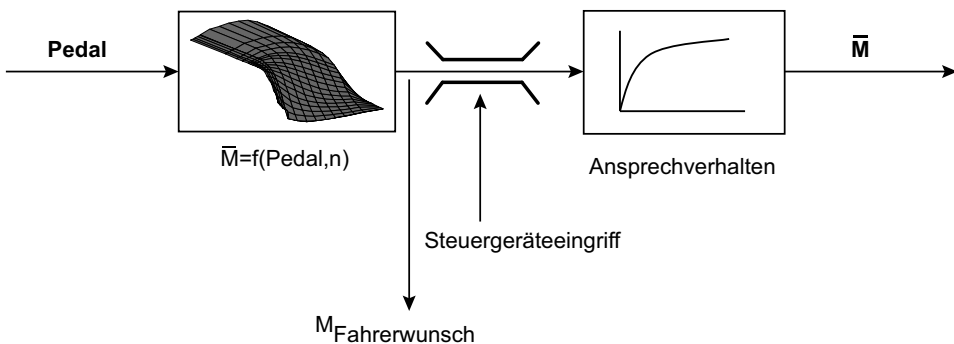
Immer kürzere Entwicklungszeiten erfordern eine Parallelentwicklung von Verbrennungsmotor und Getriebe. Der Verbrennungsmotor befindet sich zum Zeitpunkt des ersten Getriebeversuchs meist selbst noch in einem Prototypenstadium und erfüllt noch nicht den für die Getriebeerprobung notwendigen Reifegrad hinsichtlich Lebensdauer und Leistungsdaten. Der Ersatz des Verbrennungsmotors durch eine elektrische Maschine (Prime Mover) löst diesen Konflikt und ermöglicht darüber hinaus zusätzlich die Reduktion von Prototypenkosten.

Die Hauptanforderung an den Prime Mover ist die Abbildung der schädigungsrelevanten Belastungen auf den Antriebsstrang. Hierbei muss zwischen der Belastung

durch das mittlere abgegebene Motormoment und der Drehungleichförmigkeit des Verbrennungsmotors als Folge seines diskontinuierlichen Arbeitsprozesses unterschieden werden.

Das mittlere abgegebene Motormoment kann vereinfacht in Abhängigkeit von Drehzahl und Fahrpedalstellung dargestellt werden. Weiterhin muss das Ansprechverhalten des Verbrennungsmotors bei Lastwechsel durch ein zeit- bzw. winkeldiskretes Verzögerungsglied berücksichtigt werden. Die Belastungen des Getriebes werden allerdings nicht allein durch die Fahreraktionen und die entsprechende Straßenlast bestimmt, sondern auch durch das Verhalten der verschiedenen Steuergeräte.

Steuergeräteabhängige Belastungen entstehen durch die Kommunikation der Steuergeräte untereinander. Daraus resultieren Forderungen an das Motorsteuergerät, z. B. Drehmomentreduktion während einer Schaltung. Diese Signale werden üblicherweise auf dem CAN-BUS (siehe Kapitel 3.5.2) übertragen. Somit müssen die Komponenten des Motorsteuergerätes, die Auswirkungen auf die Belastung haben, nachgebildet werden (siehe Abb. 2-55). Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass das Fehlen einzelner Steuergeräte zu Plausibilitätsfehlern der CAN-Botschaften und somit zum eingeschränkten Notlaufbetrieb führt. Deshalb ist eine CAN-Restbussimulation (siehe auch Abschnitt 4.5.7) zwingend erforderlich, die plausible CAN-Botschaften generiert.



**Abb. 2-55** Modell eines Verbrennungsmotors für das mittlere abgegebene Drehmoment

Die Drehungleichförmigkeit wird durch die Kräfte am Kurbeltrieb erzeugt. Diese entstehen aufgrund der Verbrennung (Gaskräfte) und der ungleichförmigen Bewegung der Massen (Massenkräfte). Die Gaskraft wird hauptsächlich durch die verbrannte Kraftstoffmasse bestimmt, während die Massenkraft drehzahlabhängig ist. Der Momentanwert der resultierenden Kraft wird unter anderem durch Motorbauform, Anzahl der Zylinder und Verbrennungsverfahren bestimmt. Der Verbrennungsprozess ist ein kurbelwinkelsynchroner Prozess; das Arbeitsspiel eines Viertaktmotors erstreckt sich über 720 °KW.

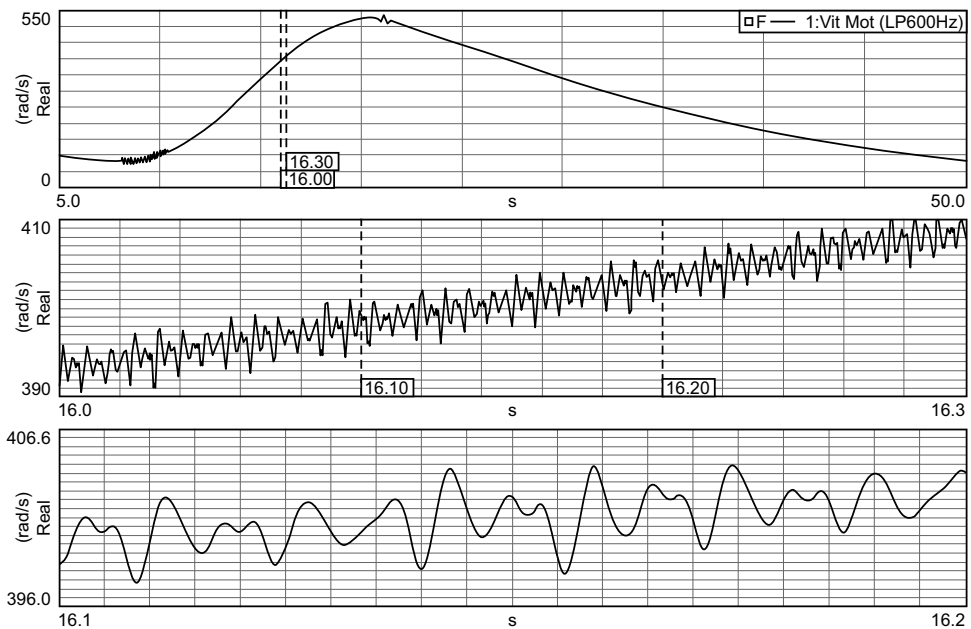
Die Drehungleichförmigkeit  $x(t)$  kann nicht durch eine geschlossene Funktion dargestellt werden. Diese lässt sich aber über ein Arbeitsspiel durch eine Fourieranalyse approximieren.

$$x(t) = a_0 + \sum_{i=0,5}^{\infty} (a_i \cdot \cos(i\omega_0 t + \varphi_{a,i}) + b_i \cdot \sin(i\omega_0 t + \varphi_{b,i}))$$

### Gleichung 2-7 Drehungleichförmigkeit

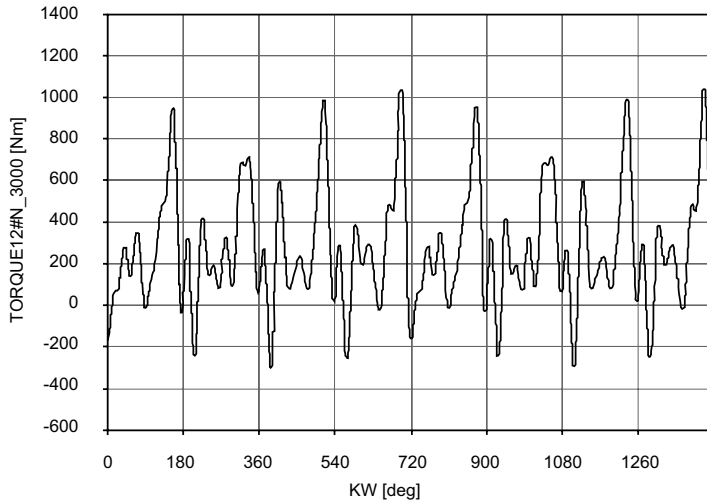
Die Drehungleichförmigkeit kann somit als Superposition einer Grundschiwingung (Anzahl der Arbeitsspiele pro Umdrehung) und Oberschwingungen (Ordnungen bzw. Vielfache der Grundschiwingung) beschrieben werden. Die Drehungleichförmigkeit führt zur Anregung von Drehschwingungen, die sich im kompletten Antriebsstrang auswirken, z. B. Ruckeln, Getrieberasseln, etc.

Für einen Vierzylinder-Viertaktmotor ergibt sich bei  $6000 \text{ min}^{-1}$  eine Frequenz von 200 Hz für die Grundschiwingung (Zündfrequenz, 2. Ordnung) und 400 Hz für die nächste Harmonische (4. Ordnung) (siehe Abb. 2-56).

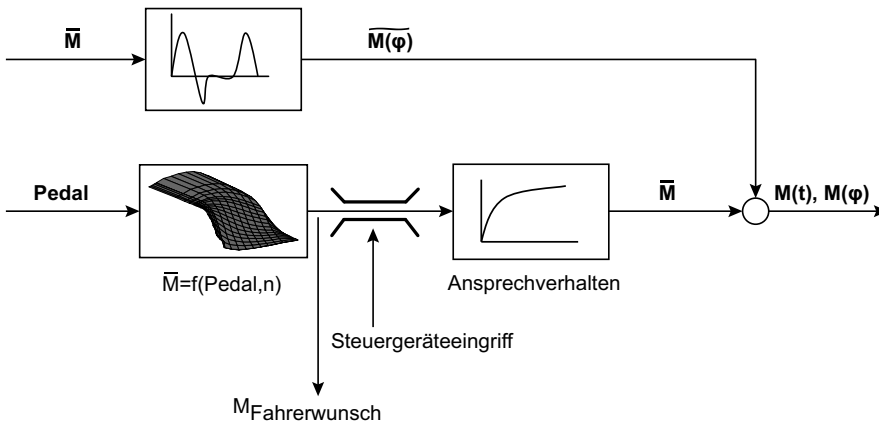


**Abb. 2-56** Drehungleichförmigkeit eines Vierzylinder-Dieselmotors

Zur Nachbildung der Drehungleichförmigkeit wird dem mittleren Motormoment das aus den mittelwertfreien Gas- und Massenkräfte resultierende Drehmoment überlagert (siehe Abb. 2-57). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Drehungleichförmigkeit ein kurbelwinkelsynchrones Signal ist (siehe Abb. 2-58).



**Abb. 2-57** Kurbelwinkelsynchrones Drehmoment eines Vierzylinder-Viertakt-Dieselmotors

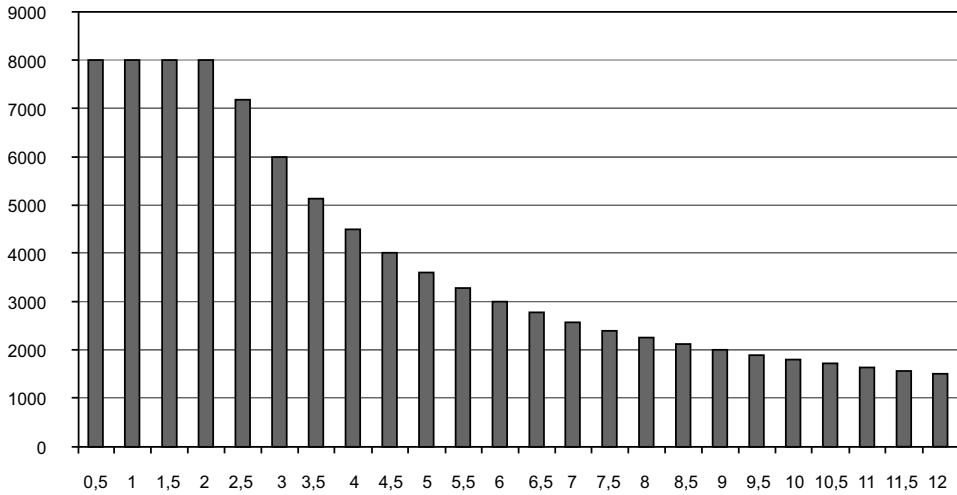


**Abb. 2-58** Modell des Verbrennungsmotors mit Drehungleichförmigkeit

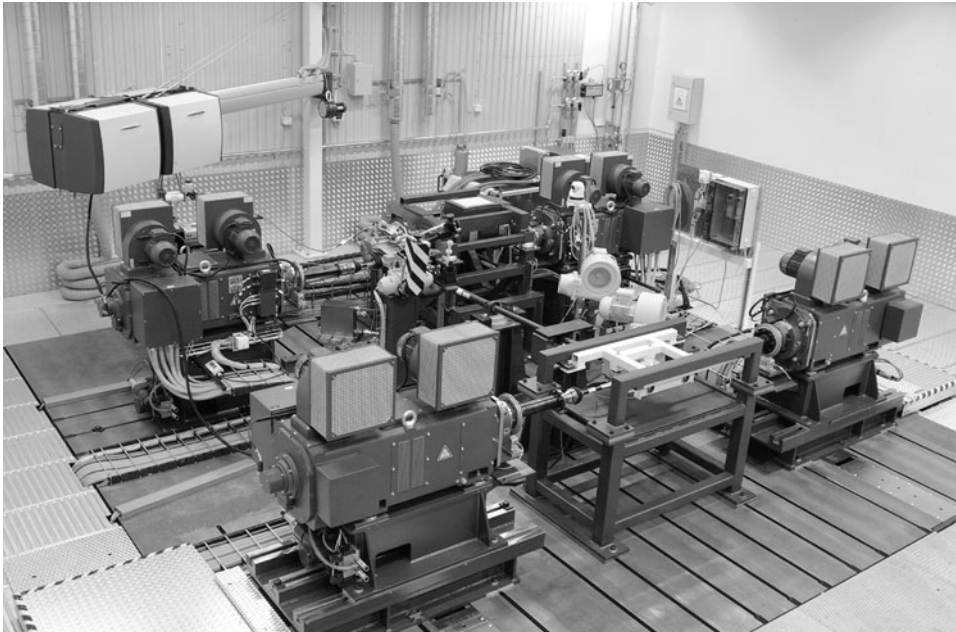
Damit die elektrische Antriebsmaschine die Drehungleichförmigkeit darstellen kann, muss diese einige Designkriterien erfüllen:

- Das polare Massenträgheitsmoment des Maschinenrotors sollte dem polaren Massenträgheitsmoment des Verbrennungsmotors (Kurbeltriebes) möglichst nahe kommen (siehe Abb. 2-59).
- Die Bauform der elektrischen Maschine sollte den Ersatz eines quer eingebauten Frontmotors ermöglichen. Insbesondere bei quer eingebauten Motoren ist der Bauraum hinsichtlich Abstand zwischen Getriebeeingangs- und Ausgangswelle und zur Verfügung stehender maximaler Länge begrenzt. Hieraus ergibt sich die Anforderung an einen möglichst kompakten Prime Mover, d. h. kurze Baulänge und geringer Durchmesser (siehe Abb. 2-60).

- Kurze Drehmomentregelzeiten und Signallaufzeiten des Prime Movers sind zwingend erforderlich, damit die Drehungleichförmigkeit des Verbrennungsmotors nachgebildet werden kann.



**Abb. 2-59** Darstellbare maximale Drehzahl als Funktion der Motorordnung für 300-Hz-Grenzfrequenz



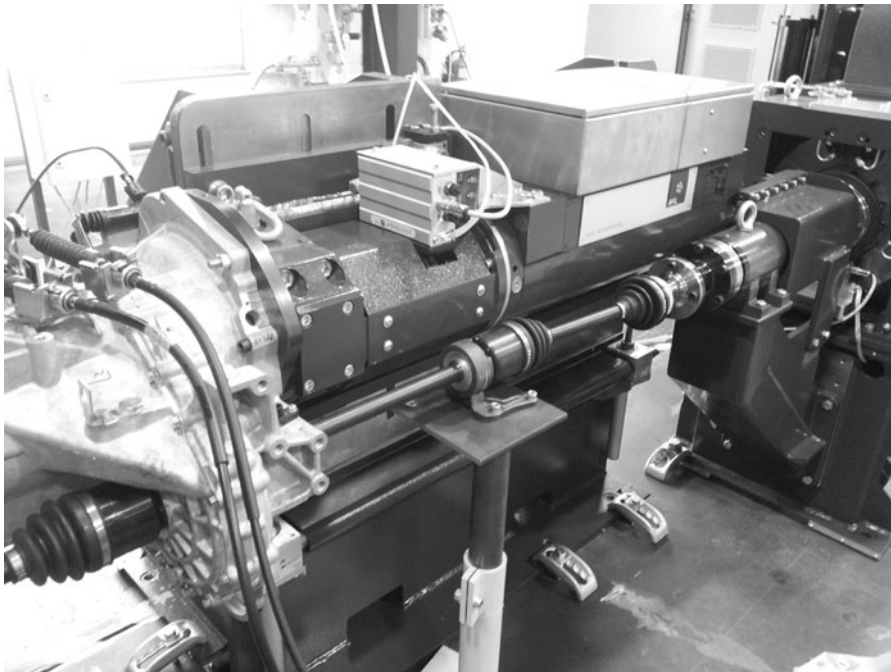
**Abb. 2-60** Allradprüfstand mit Prime Mover

Am Prüfstand wird zur Nachbildung der Drehungleichförmigkeit eine hochdynamische permanent erregte Drehstromsynchronmaschine eingesetzt. Typische Leistungsdaten sind:

- Nennleistung 370 kW
- Maximale Drehzahl  $10\,000\text{ min}^{-1}$
- Nennmoment 650 Nm
- Max. Überlastmoment 1300 Nm
- Massenträgheitsmoment  $0,118\text{ kgm}^2$
- Länge 1150 mm

Der Auslegung der Überlastfähigkeit des Prime Movers kommt eine besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zu den elektrischen Antriebsmaschinen treten bei der Simulation der Drehungleichförmigkeit die Drehmomentspitzen dauernd auf. Deshalb ist diese elektrische Maschine für den ununterbrochenen Dauerbetrieb mit Drehzahländerung auszulegen (Betriebsart S8 gemäß IEC 60034-1).

Weiterhin ist ein entsprechender Bezugspunkt für die Dauerbelastung zu wählen. Die maximale Dauerbelastung der Maschine ergibt sich üblicherweise durch die maximal zulässige Erwärmung. Ein konstantes Drehmoment bringt die gleiche Erwärmung in die Maschine wie der Effektivwert eines periodischen Drehmomentsignales. Somit ist ein dauerhafter periodischer Betrieb (Betriebsart S8) des Prime Movers gegeben, wenn der Effektivwert der Drehmomentsignale  $M(t)$  kleiner ist als der Nennwert der Maschine.



**Abb. 2-61** FWD-Prüfstand mit Prime Mover

Weiterhin ist zu beachten, dass durch das Aufprägen periodischer Signale Wirbelströme im Rotor entstehen können. Diese führen infolge zu einer lokalen Erwärmung bzw. Erhitzung des Rotors. Um eine Schädigung des Rotors zu verhindern, müssen Wirbelströme vermindert werden, d. h. die maximale darstellbare Frequenz ist auf 300 Hz zu beschränken (siehe Abb. 2-59).

Diese Simulationsfrequenzen lassen sich nur durch eine steife Ankopplung des Prime Movers an das Getriebe übertragen.

### 2.4.3 Hybridantriebsstrangprüfstände

Die Antriebsstrangprüfstände für Hybridantriebe unterscheiden sich nicht von den im Kapitel 2.4.1 beschriebenen Antriebsstrangprüfständen, da die Antriebsaggregate immer als Einheit gesehen werden können. Sie übertragen an der Schnittstelle immer Moment und Drehzahl unabhängig davon, ob nur ein Verbrennungsmotor oder aber eine Hybridkombination (Verbrennungsmotor mit seriellen oder parallelen Elektromotoren, Range Extender mit Elektroantrieben, Brennstoffzellensysteme bei Elektrofahrzeugen etc.) zum Einsatz kommen.

## 2.5 Fahrzeugprüfstände

Rollenprüfstände können als Integrationsprüfstände in Forschung und Entwicklung sehr flexibel eingesetzt werden. Vor der Erteilung der Betriebserlaubnis müssen Fahrzeuge hinsichtlich vieler Aspekte regionsspezifisch zertifiziert werden. Die wichtigsten Aspekte sind der Verbrauch, die Abgasemissionen, die Leistung, das Fahrgeräusch und die elektromagnetische Verträglichkeit. Einige Bereiche müssen (z. B. die Abgasemissionen), andere Bereiche können (z. B. elektromagnetische Verträglichkeit) auf Rollenprüfständen zertifiziert werden. Das Fahrgeräusch muss beispielsweise auf der Straße bestimmt werden – hier dient der Rollenprüfstand aber als Entwicklungsplattform.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass Rollenprüfstände sich immer mehr vom Zertifizierungswerkzeug hin zu mechatronischen Entwicklungsplattformen für Kalibrierungs-, Systemoptimierungs- und Systemvalidierungsaufgaben hin entwickeln [12].

Rollenprüfstände sind in Bezug auf ihre Prüflinge sehr flexibel. Das Spektrum beginnt bei Motorrädern bzw. Kleinstfahrzeugen, geht über PKW und leichte Nutzfahrzeuge bis hin zu schweren Nutzfahrzeugen und mobilen Arbeitsmaschinen (siehe Abb. 2-62).

Abhängig vom Anwendungsfall und den baulichen Gegebenheiten kommen verschiedene Konzepte an Rollen- und Motorkonfigurationen zum Einsatz:

- 1x1-Rolle: Eine Rolle auf einer Achse mit einer Belastungsmaschine (Beispiel: Motorrad)
- 2x1-Rolle: Zwei Rollen auf einer Achse mit einer Belastungsmaschine (Beispiel: Fahrzeug mit Frontantrieb, Applikation Abgaszertifizierung)
- 2x2-Rolle: Zwei Rollen mit jeweils einer separaten Belastungsmaschine, die nicht mechanisch verbunden sind (Beispiel Fahrzeug mit Frontantrieb, Applikation NVH – Noise, Vibration, Harshness – siehe Kapitel 2.5.4)





**Abb. 2-62** Fahrzeugspektrum auf Rollenprüfständen

- 4x2-Rolle: Vier Rollen, zwei jeweils auf einer Achse mit einer Belastungsmaschine (Beispiel: Fahrzeug mit Allradantrieb, Applikation Abgaszertifizierung)
- 4x4-Rolle: Vier Rollen mit jeweils einer separaten Belastungsmaschine, die nicht mechanisch verbunden sind (Beispiel Fahrzeug mit Allradantrieb, Applikation NVH)

Für Sonderanwendungen existieren noch weitere Konfigurationen, die es beispielsweise erlauben, Fahrzeuge mit mehr als zwei Achsen auf Rollenprüfständen zu betreiben. In Bezug auf die Motoranordnung gibt es ebenfalls unterschiedliche Konfigurationen:

- Inline-Anordnung: Der Motor ist neben der Rolle/den Rollen angeordnet. Dieser ist entweder direkt gekoppelt oder über ein Getriebe verbunden, um beispielsweise die Zugkraft zu erhöhen.

- Motor-in-the-Middle-Anordnung: Der Motor ist zwischen den Rollen angeordnet. Die Rollen sind direkt auf der Motorwelle montiert.
- Motor-in-the-Roll-Anordnung: Der Motor ist als Außenläufer in die Rolle eingebaut.

Um einen sicheren und auch benutzerfreundlichen Betrieb zu erlauben, gibt es zahlreiche Peripherien. Im Folgenden sind einige Beispiele dafür aufgeführt:

Ein zentrales Anbauteil ist die **Fahrzeugfesselung**. Diese verhindert, dass sich das Fahrzeug während des Tests von den Rollen bewegen kann. Abhängig vom Fahrzeugtyp, der Anwendung und dem Messprozess kommen verschiedenen Fesselungskonzepte zum Einsatz (Abb. 2-63).



**Abb. 2-63** Fesselungskonzepte an Fahrzeugrollenprüfständen

Zur Ausrichtung des Fahrzeuges auf den Rollen kommen spezielle **Zentriervorrichtungen** zum Einsatz. Diese ermöglichen die Zentrierung des Reifens auf dem Scheitelpunkt der Rolle. Des Weiteren kann das Fahrzeug mittels der Zentriervorrichtung komplett angehoben werden, um automatisiert Verifikationsläufe des Prüfstandes ohne Fahrzeug durchführen zu können (siehe Abb. 2-64).



**Abb. 2-64** Zentriervorrichtung geöffnet (links), geschlossen (rechts)

Zusätzlich werden verschiedenste Fahrwindlöffler, Konditioniermodule, Batterieemulatoren, Betankungsanlagen, Klimasensoren etc. nach Bedarf eingesetzt.

Es gibt unterschiedliche Anwendungsgebiete von Rollenprüfständen:

- Rollenprüfstände für Emissionsentwicklung und -zertifizierung
- Rollenprüfstände für Verbrauchs- und Leistungsmessungen

- Rollenprüfstände für Dauerlauf und Dauerfestigkeit
- Rollenprüfstände für NVH-Analysen
- Rollenprüfstände für EMV-Analysen
- Rollenprüfstände für erweiterte Applikationen

### 2.5.1 Rollenprüfstände für Emissionsentwicklung und -zertifizierung

Der Hauptanwendungsfall von Tests auf Rollenprüfständen ist die Abgasemissionszertifizierung. Da diese Prozedur durch die Gesetzgebung vorgeschrieben ist, gibt es klare Randbedingungen und Vorschriften, welche die Anforderungen an entsprechende Rollenprüfstände beschreiben. Die „Dynamometer Performance Evaluation and Quality Assurance Procedures for 48-Inch, Single Roll, Electric, Light Duty Chassis Dynamometers“ beschreibt die erforderlichen Kriterien und deren Abnahmeprozeduren, beginnend beim Rollendurchmesser, über verschiedene Mess- und Regelgenauigkeiten bis hin zu Anforderungen an das Fahrzeugfesselungssystem. Weitere Anforderungen sind in den Gesetztestexten verankert. Folgende Liste zeigt eine Zusammenstellung von wichtigen Kriterien:

- Rollendurchmesser und Rundlauf
- Oberflächenrauigkeit
- Genauigkeit der Zeit-, Geschwindigkeits- und Zugkraftmessung
- Systemverhalten in Bezug auf Antwortzeit, Überspringen und Einschwingen
- Genauigkeit der Straßenlastsimulation (Vergleich von theoretischen Sollwerten mit den simulierten Istwerten)
- Steifigkeit der Fahrzeugfesselung (Kriterium ist die Bewegung des Fahrzeuges bei entsprechend starken Beschleunigungen)
- Fahrtwindgebläse (Homogenität und Volumenstrom)

Zusätzlich wird der Prüfstand mit einer entsprechenden Mess- und Automatisierungstechnik ausgestattet, um gesetzteskonforme Tests durchführen zu können. Nach aktueller Gesetzgebung werden für die Messung von Emissionen und Verbrauch standardisierte, regions- und länderspezifische Zyklen verwendet. In Abb. 2-65 und Abb. 2-66 sind zum einen der NEFZ (Neuer europäischer Fahrzyklus) für Europa und zum anderen der FTP75 (Federal Test Procedure) für die USA dargestellt. Der NEFZ wird in weiterer Zukunft durch die WLTP (World Harmonized Light Duty Test Procedure) abgelöst.

Alle drei sind generische Geschwindigkeits-Zeit-Profile, die von einem realen Prüfstandsfahrer nachgefahren werden müssen. Zum Einsatz kommen hierzu Fahrerleitgeräte, die dem Fahrer das Profil mit einer entsprechenden Vorausschau sowie Ganginformationen etc. visualisieren. In einem vorgegebenen Toleranzband muss das Geschwindigkeitsprofil schließlich nachgefahren werden.

Neben reinen Zertifizierungsaufgaben ist ein weiteres wichtiges Thema die Abgasemissionsentwicklung, d. h. deren Analyse und Optimierung. Häufig werden derartige Aufgaben über Nacht automatisiert durchgeführt. Somit können Rollenprüfstände sehr effizient eingesetzt werden.

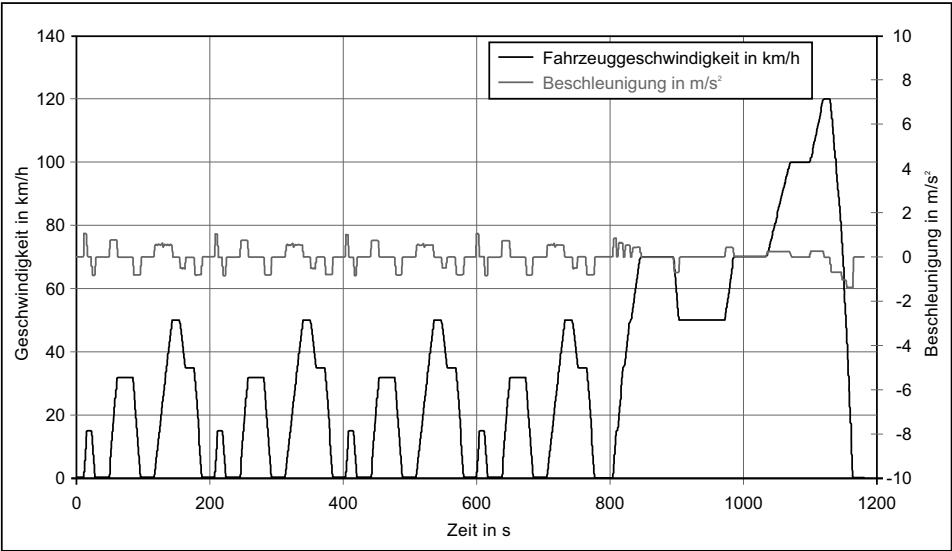


Abb. 2-65 Europäischer Fahrzyklus

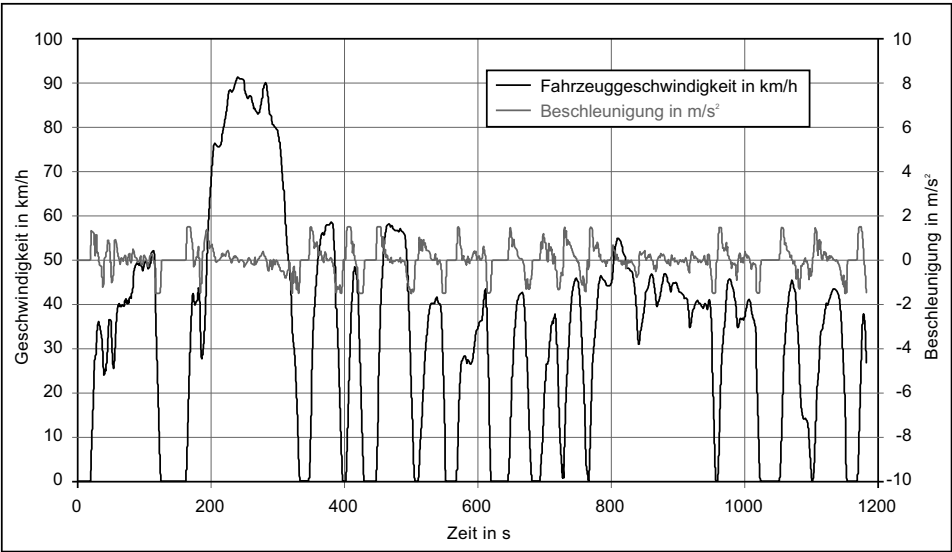


Abb. 2-66 Federal Test Procedure

Typische Aufgaben hierbei sind:

- Partikelanzahloptimierung bei Otto-Motor für EU6 (im Fahrzyklus)
- SCR-Dosierstrategie für  $\text{NO}_x$ -Optimierung (Kennfeldrasterung bei Variation der Dosierung)
- Partikelfilterbeladung (im Fahrzyklus)
- Optimierung der Abgastemperatur

Abb. 2-67 zeigt einen modernen Rollenprüfstand zur Abgasemissionszertifizierung. Für erweiterte Applikationen besitzt er vier einzeln angetriebene Rollen (4x4-Konfiguration) sowie modernste Automatisierungs- und Simulationstechnik.



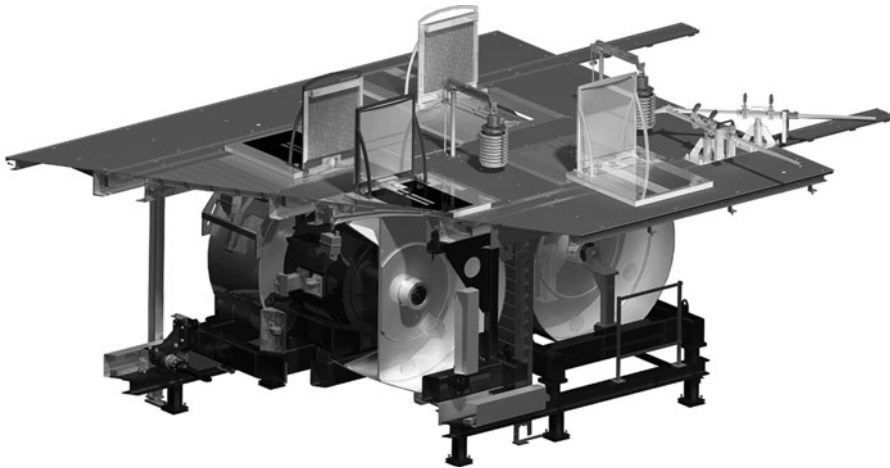
**Abb. 2-67** Moderner 4x4-Rollenprüfstand mit Schwerpunkt auf Abgasemissionszertifizierung (Quelle: TÜV Hessen Automotive)

### 2.5.2 Rollenprüfstände für Verbrauchs- und Leistungsmessungen

Rollenprüfstände für Verbrauchs- und Leistungsmessungen haben weitestgehend dieselben Anforderungen wie Abgasrollenprüfstände. Da die Verbrauchswerte eines Fahrzeuges aus den Emissionen berechnet werden können, führt man Verbrauchsmessungen auch häufig auf diesen Prüfständen durch.

Betrachtet man allerdings den Verbrauch auf einer detaillierteren Ebene, d. h. vorwiegend in Forschung und Entwicklung, kommen andere Anforderungen an den Prüfstand zum Tragen. Hierbei geht es in erster Linie um die Messung von Verlusten im Antriebsstrang und im Reifen, um danach Rückschlüsse auf den Verbrauch treffen zu können.

Voraussetzung dafür ist ein Prüfstand mit sehr hoher Messgenauigkeit und ein angepasster Laufrollendurchmesser. Grundsätzlich funktionieren für diese Anwendung auch 48''-Rollen. Um allerdings einen Kompromiss zwischen Abrollverhalten und kleinem Radstand zu erhalten, bieten sich Laufrollen mit einem Durchmesser von 69'' an. Abb. 2-68 zeigt ein Beispiel für einen Rollenprüfstand für Effizienzbetrachtungen. Vorteile sind das steife Design, die hohen Genauigkeiten und die beschriebenen 69''-Laufrollen.



**Abb. 2-68** 69''-Rollenprüfstand für Effizienzbetrachtungen

Der Zusammenhang zwischen Rollwiderstand auf der Straße und auf der Rolle kann annähernd durch folgende Formel beschrieben werden:

$$F_{xR} = F_x \left( 1 + \frac{r}{R_r} \right)^{1/2}$$

$F_{xR}$  Rollwiderstand auf der Rolle  
 $F_x$  Rollwiderstand auf der Straße  
 $r$  Reifenradius  
 $R_r$  Rollenradius

**Gleichung 2-8** Rollwiderstand

Abb. 2-69 zeigt diesen Zusammenhang nochmals grafisch. Angenommen wurde ein Reifenradius von 0,3 m. Es ist zu erkennen, dass dieser Reifen auf einer 25''-Rolle ca. 40 % mehr Rollwiderstand hat als auf der Straße.

Die Leistungsmessung auf Rollenprüfständen kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Ziel ist es, ein Motorkennfeld zu erhalten, bei dem die Leistung und das Drehmoment des Motors über der Geschwindigkeit bzw. Motordrehzahl aufgetragen werden, wie man dies von Motorprüfständen gewohnt ist. Zur Messung des Kennfeldes stehen verschiedene Methoden zur Verfügung (siehe Tab. 2-2).

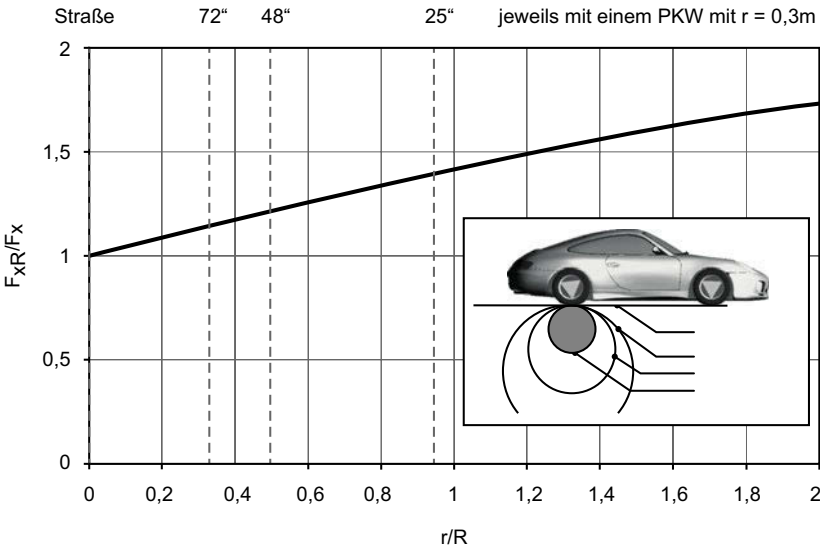
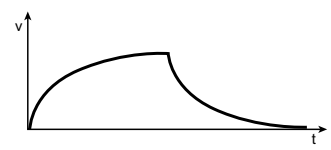
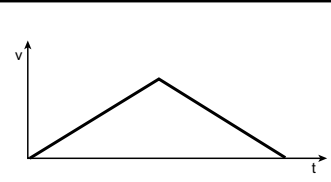
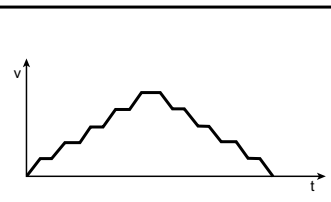


Abb. 2-69 Zusammenhang Rollwiderstand auf der Straße und auf dem Rollenprüfstand

Tab. 2-2 Methoden zur Leistungsmessung auf Rollenprüfständen

	<p><b>Leistungsmessung in Straßenlastsimulation (dynamisch):</b> Das Fahrzeug fährt in Straßenlastsimulation eine Vollastbeschleunigung bis zur gewünschten Geschwindigkeit mit anschließendem Ausrollen, um die Antriebsstrangverluste zu ermitteln.</p>
	<p><b>Leistungsmessung in Geschwindigkeitsregelung mit Rampe (quasi-statisch):</b> Der Prüfstand wird in Geschwindigkeitsregelung betrieben während am Fahrzeug 100% Fahrpedal eingestellt werden. Dabei wird die Geschwindigkeit sehr langsam (quasi-statisch) hochgeramppt. Um die Verluste zu erfassen, erfolgt danach eine Rampe mit negativem Vorzeichen.</p>
	<p><b>Leistungsmessung in Geschwindigkeitsregelung mit Stufen (statisch):</b> Der Prüfstand wird in Geschwindigkeitsregelung betrieben während am Fahrzeug 100% Fahrpedal eingestellt werden. Bei definierten Geschwindigkeitspunkten werden Stationär-Geschwindigkeiten eingestellt. An diesen Punkten erfolgt die Messungen der Zugkraft bzw. die Berechnung der Leistung ebenfalls stationär.</p>

Die einzelnen Methoden haben Vor- und Nachteile hinsichtlich Durchführung und Genauigkeit. Wird die Messung beispielsweise dynamisch durchgeführt, sind Einflüsse aus der Beschleunigung der Antriebsstrangkomponenten vorhanden. Diese sind direkt in der

aus gemessener Zugkraft und Geschwindigkeit berechneten Leistung sichtbar. Eine beispielhafte Berechnung für einen Antriebsstrang und der Einflüsse durch die Beschleunigung der Trägheiten auf die Leistung ist in Gleichung 2-9 aufgeführt.

$$\begin{aligned}
 \text{Trägheit Motor:} & \quad \theta_{\text{Motor}} = 0,6 \text{ kgm}^2 \\
 \text{Trägheit Getriebe:} & \quad \theta_{\text{Getriebe}} = 0,2 \text{ kgm}^2 \\
 \text{Trägheit Differential:} & \quad \theta_{\text{Diff}} = 0,05 \text{ kgm}^2 \\
 \text{Trägheit Rad/Reifen:} & \quad \theta_{\text{Rad}} = 1,7 \text{ kgm}^2 \\
 \text{Beschleunigung:} & \quad a = 2,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ (d. h. von 0 km/h auf 100 km/h in 10 s)} \\
 \text{Dynamischer Reifenradius:} & \quad r_{\text{dyn}} = 0,23 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\text{Trägheit Antriebsstrang:} \quad \theta_{\text{PT}} = i_{\text{Diff}}^2 \cdot i_{\text{Getriebe}}^2 \cdot (\theta_{\text{Motor}} + \theta_{\text{Getriebe}}) + i_{\text{Diff}}^2 \cdot \theta_{\text{Diff}} + 2 \cdot \theta_{\text{Rad}} = 4,25 \text{ kgm}^2$$

Zur Abschätzung wird die Übersetzung  $i$  auf 1 gesetzt.

Damit ergibt sich als resultierende Kraft an der Reifen/Rollenoberfläche:

$$F = \theta_{\text{PT}} \cdot \frac{a}{r_{\text{dyn}}^2} = 4,25 \text{ kgm}^2 \cdot \frac{2,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{(0,23 \text{ m})^2} = 217 \text{ N}$$

$$\text{Resultierende Leistung bei 120 km/h: } P = F \cdot v = 217 \text{ N} \cdot 33,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7226 \text{ W}$$

$$\text{Resultierende Leistung bei 60 km/h: } P = F \cdot v = 217 \text{ N} \cdot 16,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3602 \text{ W}$$

**Gleichung 2-9** Beispielhafte Berechnung der Einflüsse der Trägheiten auf die Leistung

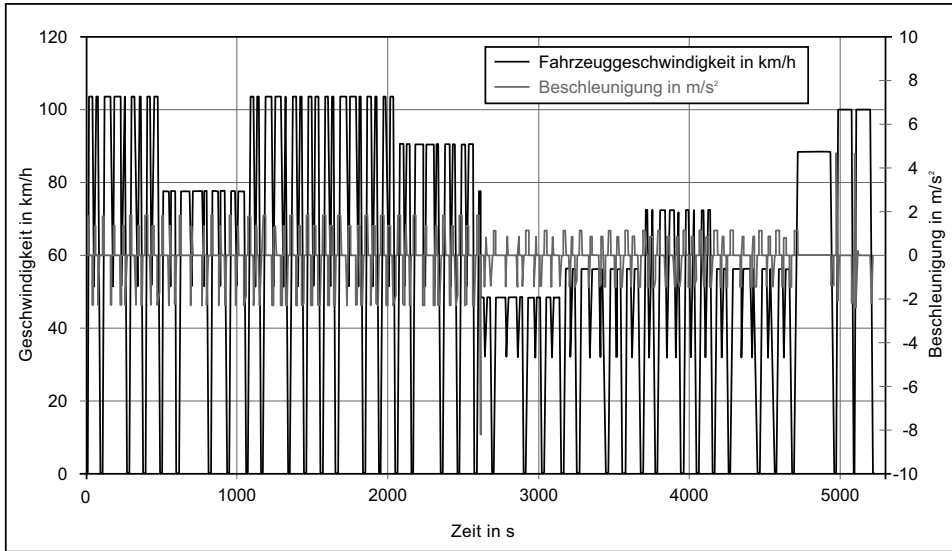
Ein wichtiger Aspekt ist der vorhandene Reifenschlupf, der bei der Leistungsmessung auf Rollenprüfständen berücksichtigt werden muss. Einfache Korrekturen über die Drehzahldifferenz zwischen Reifen und Rolle sind nicht zwangsläufig zielführend, da im Schlupfzustand eine entsprechende Wärmeleistung abgegeben wird, die der Motor aufbringen muss. Der Schlupf hängt von verschiedenen Randbedingungen wie Luftdruck, Rollendurchmesser und auch Position des Reifens auf der Rolle ab. Insbesondere bei leichten Fahrzeugen oder Motorrädern ist der Einfluss des Fahrers (Masse des Fahrers und daraus resultieren Normalkraft auf die Rolle) deutlich in den Leistungswerten zu erkennen.

### 2.5.3 Rollenprüfstände für Dauerlauf und Dauerfestigkeit

Im Hinblick auf die Zertifizierung von Fahrzeugen spielt auch das Langzeit- und Alterungsverhalten eine Rolle. Hierzu existieren ebenfalls spezielle Zyklen. Insbesondere für derartige Tests, die in der Regel über größere Distanzen als 100 000 km durchgeführt werden, ist es nicht mehr sinnvoll auf einen realen Fahrer zurückzugreifen. Daher kommen hier Fahrroboter zum Einsatz, um alle Schnittstellen vom Fahrzeug zur Rolle zu bedienen.



Da die Prüfläufe voll automatisiert und über lange Zeit durchgeführt werden, sind spezielle Anforderungen an die Prüfumgebung des Rollenprüfstands gegeben. Hierzu zählen unter anderem erweiterte Überwachungssensorik, z. B. für die Erkennung von Reifenplatzen, Betankungsanlagen etc. Die existierenden Zyklen sind auch wiederum abhängig von der Gesetzgebung. Beispiele dafür sind der AMA-Zyklus (Abb. 2-70) oder SRC (Standard Road Cycle – Abb. 2-71). Nach definierten Distanzen (z. B. 5000 km) werden Emissionsmessungen durchgeführt, um das Langzeitverhalten zu analysieren.



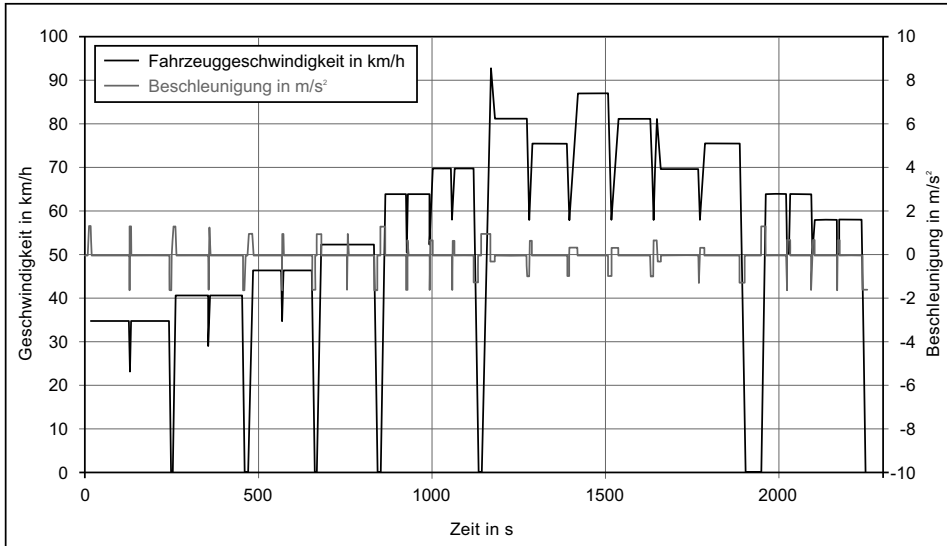
**Abb. 2-70** AMA-Zyklus

Eine weitere Anwendung in diesem Umfeld ist die Untersuchung von Dauerfestigkeit und Schädigungen an Komponenten. Diese kommt insbesondere im Bereich Forschung und Entwicklung zum Einsatz.

Hierbei gibt es verschiedene Ansätze: Zum einen können reale Strecken auf Rollenprüfständen reproduziert, und zum anderen – um die Effizienz zu steigern – schädigungsbezogenen Raffungen durchgeführt werden. Durch die Elimination von wenig schädigungswirksamen Lastkollektivabschnitten können Zeit und Kosten eingespart werden.

Es gibt zahlreiche Ansätze von Raffungen, um unterschiedliche Komponenten im Fahrzeugantriebsstrang zu untersuchen. Beispielhaft sind hier zwei Ansätze aus dem Bereich der Kupplungsentwicklung angeführt:

- Hill-Start-Test: Hierbei werden unter anderem verschiedene Berganfahrten mit verschiedenen Steigungen mit bzw. ohne Anhänger durchgeführt.
- Normalprogramm: Hierbei werden mit einer definierten Einkuppelfrequenz mehrere tausend Schaltungen ununterbrochen durchgeführt.



**Abb. 2-71** Standard Road Cycle

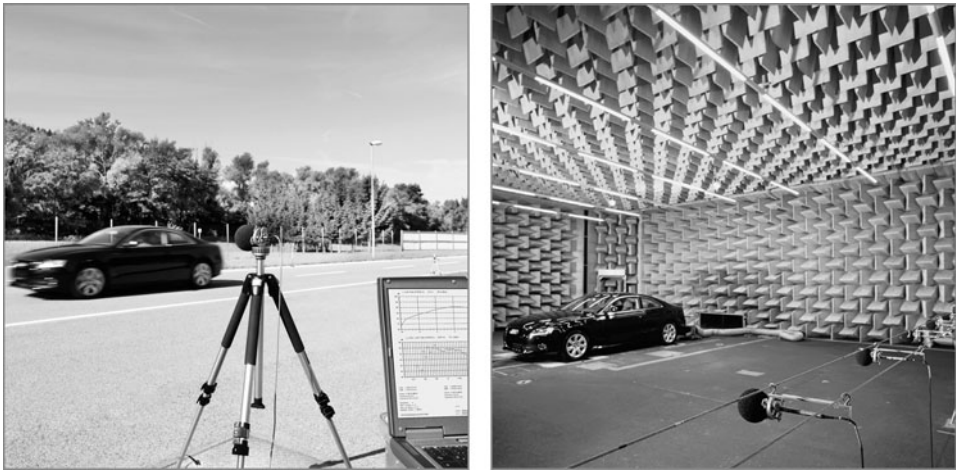
Für derartige Tests kommen heutzutage vorwiegend Komponentenprüfstände (siehe Abschnitt 2.2.3) zum Einsatz. Eine Validierung auf dem Rollenprüfstand ist ebenfalls möglich.

#### 2.5.4 Rollenprüfstände für NVH-Analysen

Ein sehr breit gefächertes Feld ist die Analyse und Optimierung des NVH-Verhaltens. Dabei steht NVH für „Noise“ (Geräusche), „Vibration“ (Vibrationen) und „Harshness“ (Rauheit, 20 bis 100 Hz). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Außen- und Innenraumakustik. Je nach Anwendung gibt es spezielle Anforderungen an NVH-Rollenprüfstände und den zugehörigen Hallen. Ein paar Besonderheiten sind im Folgenden aufgeführt:

- Vibrationsgedämpfte Lagerung des Fundaments
- Straßenbelagssimulation durch Verwendung von Roadshells
- Störpegel <50 dB(A) bei 100 km/h
- Arbeitsplattform mit verschließbarer Grube unter dem Fahrzeug (z. B. um Modifikationen am Fahrzeug vornehmen zu können)

In Bezug auf die Außenakustik ist die simulierte Vorbeifahrtsmessung ein häufiger Anwendungsfall. Die Vorbeifahrtsmessung auf der realen Straße ist ebenfalls für die Erteilung einer Betriebserlaubnis ein relevanter Prüflauf, der zu Abnahmezwecken allerdings ausschließlich auf der Straße durchgeführt wird (siehe Abb. 2-72 links). Hierbei wird ein Mikrophon in einem definierten Abstand zum Fahrzeug aufgebaut. Das Testfahrzeug passiert dieses Mikrophon mit einer Vollastbeschleunigung aus einer definierten Geschwindigkeit.



**Abb. 2-72** Vorbeifahrtmessung auf der realen Teststrecke (links) und simuliert auf dem Rollenprüfstand (rechts)

Zur Optimierung und Analyse dieses Verhaltens kann dieser Versuch auch auf NVH-Rollenprüfständen durchgeführt werden. Der Aufbau ist hier vergleichbar. Da sich das Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand allerdings nicht am Mikrophon vorbeibewegt, werden mehrere Mikrofone aufgestellt (siehe Abb. 2-72 rechts) und die Auswertung erfolgt so, als würde das Fahrzeug sich vorbeibewegen. Dafür ist ein entsprechend großer Raum erforderlich, der diesen Anforderungen genügt.

Für Komponentenanalysen und Innenraumakustik sind die Anforderungen an die Prüfzelle wesentlich geringer. Hier ist jedoch auf andere Dinge zu achten. Beispielsweise ist bei Akustikuntersuchungen am Abgassystem ein Kompromiss zwischen vernünftiger Abgasabsaugung und freiem Ausblasen zu finden. Genauso kann auch die Fahrzeugkühlung störende Einflüsse haben. Daher kommen häufig Pop-up-Kühlungen oder schallgedämpfte Lüfter zum Einsatz. Außerdem kann es wichtig sein, die Kühlung für Messungen kurzzeitig auszuschalten.

Im Bereich Akustik spielt das Thema Automatisierung eine wichtige Rolle. Viele Analysen werden in Form von Zustands-, Stationär- oder Kennfeldmessungen durchgeführt. Hierbei ist auf die Reproduzierbarkeit sowie auf das gezielte Einstellen dieser Zustände, etc. Wert zu legen, was jedoch vor allem bei Fahrzeugen mit komplexen Antriebssystemen nur noch schwer durch den menschlichen Fahrer einstellbar ist.

NVH-Rollenprüfstände sind häufig in 4x4- oder 2x2-Konfiguration vorhanden, da für die Simulation der Fahrbahnanregung, z. B. mit Schlagleisten, die unterschiedlichen Rollen phasengeregt, einzeln angesteuert werden müssen bzw. die akustische Kapselung der elektrischen Maschinen einfacher zu realisieren ist.

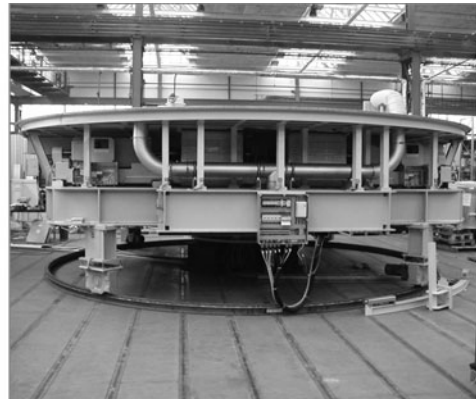
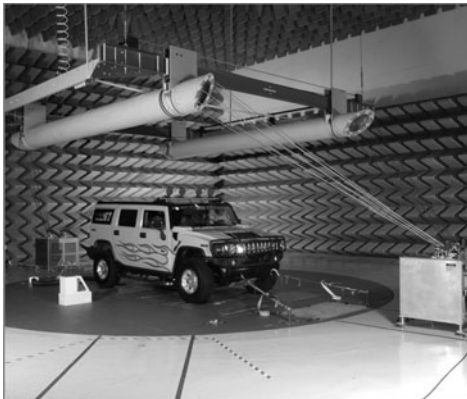
### 2.5.5 Rollenprüfstände für EMV-Analyse

Auch das Gebiet der EMV-Analyse (EMV: elektromagnetische Verträglichkeit) auf Rollenprüfständen ordnet sich im Bereich der abnahmerelevanten Tests für Fahrzeuge ein. EMV-Rollenprüfstände (siehe Abb. 2-73) müssen besonderen Anforderungen genügen. Das elektromagnetische Abstrahlverhalten muss äußerst gering sein. Des Weiteren darf das Fahrzeug nicht durch elektrische Verbindungen zum Prüfstand beeinflusst werden.

Aus diesen Gründen kommen beispielsweise pneumatische Fahrroboter sowie Gurte statt Ketten für die Fesselung des Fahrzeugs zum Einsatz. Die elektromagnetische Bestrahlung des Fahrzeuges erfolgt mit aufwendiger Technik. Dies ist ein Grund, warum EMV-Rollenprüfstände oft in einen Drehtisch integriert werden. Es ist einfacher, den Prüfstand mit Fahrzeug zu drehen als die vorhandene Mess- und Simulationstechnik. Zusätzlich können über die Drehung des Tisches auch Beschleunigungssensoren im Fahrzeug angeregt werden.

Die Hauptziele auf EMV-Rollenprüfständen sind die Ermittlung der elektromagnetischen Emissionen und die Verifikation der elektromagnetischen Immunität. Dieser Anwendungsbereich ist für Elektro- und Hybridfahrzeuge besonders interessant, da hier zum einen sehr viele Steuergeräte vorhanden und zum anderen sehr viele Hochvoltkomponenten (Verbraucher, Phasenleitungen etc.) verbaut sind.

Für sämtliche elektronische Funktionalitäten muss der fehlerfreie Betrieb unter entsprechender Bestrahlung gewährleistet sein. Daher werden in unterschiedlichen Fahrsituationen und Manövern verschiedene Funktionalitäten im einfachsten Fall eingeschalten und im komplexeren Fall bedingt durch das Manöver angeregt. Ein Beispiel hierfür ist die Anregung des ABS-Systems. Hierfür gibt es verschiedene Prüfläufe die Schlupf bzw. Drehzahldifferenzen simulieren. Aufgrund dessen sind EMV-Rollenprüfstände fast immer als 4x4-Prüfstände ausgeführt.



**Abb. 2-73** EMV-Rollenprüfstände

2.5.6 Rollenprüfstände für erweiterte Applikationen

Viele Funktionen und Abstimmungen können erst final entwickelt und validiert werden, wenn sie im Gesamtsystem integriert sind. Der Rollenprüfstand ist neben dem Antriebsstrangprüfstand die Testumgebung, in der das Gesamtfahrzeug unter reproduzierbaren Laborbedingungen getestet werden kann. Neue Ansätze ermöglichen es den Entwicklern, zum einen Tätigkeiten vom realen Fahrversuch auf derartige Prüfstände zu verlagern und zum anderen Abstimmungen im Gesamtfahrzeugverbund zu verifizieren.

Die Voraussetzung ist ein abgestimmtes Gesamtsystem, um komplexe Aufgaben auf Rollenprüfständen darstellen zu können. Rollenmechanik, -elektrik, -regelung und -automatisierung müssen optimal zusammenwirken und zugleich modular gestaltet werden können, um die Übertragbarkeit sowie die Integration verschiedenster Werkzeuge zu ermöglichen. Um dies bereitstellen zu können, ist detailliertes Know-How in Bezug auf Fahrzeug- und Antriebssysteme bei den Prüfstandlieferanten erforderlich. Beispielhaft werden zwei Anwendungen näher erläutert:

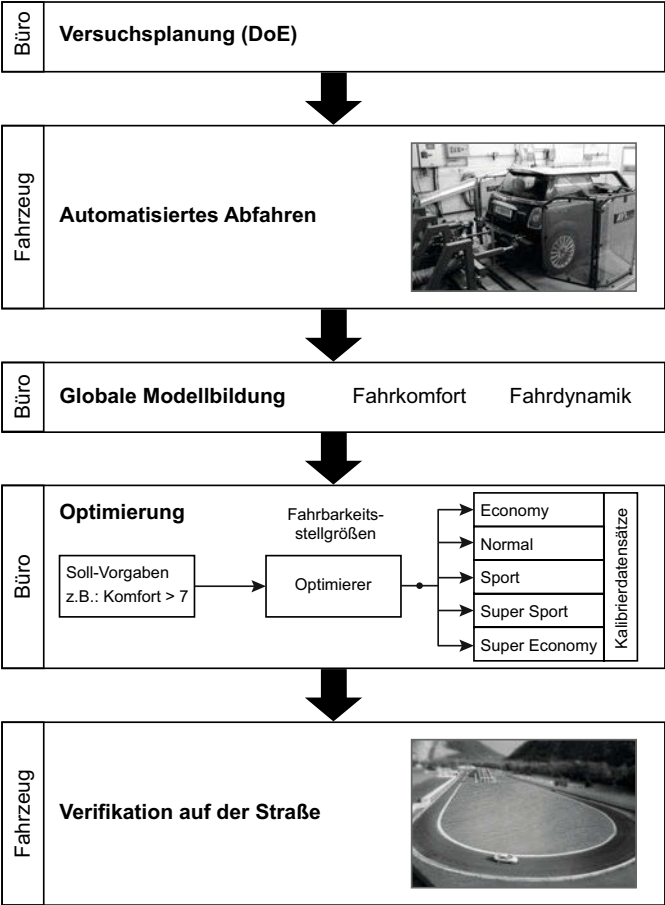


Abb. 2-74 Prozess der automatischen Getriebekalibration

**Fahrbarkeitsabstimmungen** werden heutzutage weitestgehend auf der realen Strecke durchgeführt. Dies ist sehr zeitaufwendig und verursacht dementsprechend hohe Kosten. Mit der entsprechenden Prüfumgebung und Werkzeugkette sind derartige Untersuchungen auch auf dem Rollenprüfstand möglich. In Abb. 2-74 ist der Prozess für eine **automatische Getriebekalibration** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die reale Strecke ausschließlich zur Verifikation herangezogen wird. Mit den entsprechenden Werkzeugen zur Fahrbarkeitsbewertung, Versuchsplanung und Optimierung, können große Teile voll automatisiert auf dem Rollenprüfstand oder im Büro durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Aspekt bei Fahrbarkeitsbewertungen auf Rollenprüfständen ist die Messung der Längsbeschleunigung, da sich das Fahrzeug nicht bewegt. Durch ein spezielles Fesselungskonzept (siehe Abb. 2-75) mit einer Kraftmessdose kann über die gemessene Längskraft auf die Längsbeschleunigung geschlossen werden.



**Abb. 2-75** Spezielles Fesselungskonzept zur Bestimmung der Längsbeschleunigung

Ein weiteres Beispiel ist die **Kalibration und Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen**, die unter anderem auf Navigationskartendaten zurückgreifen oder mittels entsprechender Sensorik mit ihrer Umwelt kommunizieren können (z. B. Radar, V2V, V2I etc.), um daraus einen energieeffizienten Betriebszustand abzuleiten. Der Test solcher Funktionen auf der realen Strecke ist sehr aufwendig und wenig reproduzierbar, da zu den grundsätzlichen Gegebenheiten (Temperatur, Einflüsse der Straße) auch die Unschärfe der erweiterten Umwelt (Verkehr etc.) in Wechselwirkung steht.

Auf Rollenprüfständen mit zugehörigen Umwelt- und Streckensimulationen können solche Funktionen unter Laborbedingungen reproduzierbar getestet und abgestimmt werden. Dabei wird mit einem Simulationsmodell die Strecke samt Umgebungsbedingungen und Verkehr abgebildet (siehe auch Kapitel 4.5.5). Das Modell berechnet alle relevanten Informationen und ist somit in der Lage direkt mit dem Fahrzeug zu kommunizieren. Beispielsweise können Positionsdaten für das Navigationssystem oder auch Abstand und Relativgeschwindigkeit eines vorausfahrenden Fahrzeuges eingespeist werden. Es ist ebenfalls möglich, das zu testende Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand in komplexen V2x-Szenarien (V2I, V2V) fahren und wechselwirken zu lassen (siehe Abb. 2-76).



**Abb. 2-76** Vehicle-in-the-Loop am Rollenprüfstand (Quelle: IPEK – Institut für Produktentwicklung am KIT)

## 2.6 Rennsportprüfstände

Rennsportprüfstände unterscheiden sich in ihrem Grundaufbau nur unwesentlich von den Prüfständen, die von Herstellern von Serienfahrzeugen eingesetzt werden. Auch die Entwicklungsaufgaben der Unternehmen im Rennsport entsprechen den Aufgabenstellungen der Serienfahrzeughersteller. Sie entwerfen, entwickeln, testen und fertigen in regelmäßigen Intervallen Motoren, Antriebsstränge und ganze Fahrzeuge.

Die wesentlichen Unterschiede zu einem Serienhersteller bestehen darin, dass neben den unterschiedlichen Anforderungen an die Technik die Produktlebenszyklen signifikant kürzer sind. Fahrzeugkomponenten werden für ein Rennen maximal für eine Rennsaison eingesetzt. Auch die zur Verfügung stehende Anzahl an Ingenieuren und Technikern ist dementsprechend kleiner.

Im Gegensatz zu einem Serienfahrzeug ist der Einsatzfall jedoch sehr präzise definiert und eingeschränkt. Damit entfallen viele Aspekte einer breiten Serienentwicklung, wie beispielsweise die Zuverlässigkeit von Komponenten über Jahre oder sicherheitstechnische Anforderungen. Aus diesen Beobachtungen leiten sich grundsätzlich zwei Forderungen für die Prüftechnik ab:

Sie muss die höchsten Ansprüche an Wiederholgenauigkeit, Regelungsgüte und Systemdynamik erfüllen, und sie muss möglichst vielseitig einsetzbar sein. Alle bisher aufgeführten Prüfstandssysteme, die durch die Unterscheidung des Prüflings (Motor, Komponente, Getriebe, Heißgas etc.) sowie durch die Unterscheidung der Anwendung (R&D, Dauerlauf, End-of-Line) charakterisiert sind, werden auch im Rennsport eingesetzt, nur unter anderen Randbedingungen.

Exemplarisch werden im Folgenden Motorenprüfstände und Komponentenprüfstände erläutert und die typischen Herausforderungen für den Einsatz im Rennsport herausgearbeitet.

### 2.6.1 Motorenprüfstände im Rennsport

Der stationäre Betrieb bzw. leicht transiente Betrieb von Rennmotoren am Prüfstand dient neben der Grundsatzuntersuchung von Entwicklungszielen auch der Qualitätssicherung (End-of-Line bzw. in der Motorsportterminologie Check-Out bzw. Break-In) sowie der Bedatung von Steuergeräten und der Leistungsüberprüfung.

Ein wesentlicher Vorteil von Motorsportapplikationen besteht darin, dass das Lastkollektiv für das Fahrzeug und dessen Komponenten sehr genau bekannt und vorhersagbar ist. Somit können alle Fahrzeugteile auf die im Rennen auftretenden Belastungen optimiert und geprüft werden. Nachteilig wirken sich die Einschränkungen für die praktische Erprobung auf der Straße (Rennstrecke) auf die Entwicklungsarbeit der Rennteams aus. Hier spielt die Simulation des Rennbetriebes durch die Prüfeinrichtung (Prüfstand) eine wesentliche Rolle. Am Prüfstand kann jede beliebige Rennstrecke simuliert werden, sodass der Prüfling auf die jeweilige Anforderung hin optimiert werden und die Haltbarkeit überprüft werden kann. Des Weiteren können am Prüfstand auch theoretisch erreichbare Verbesserungen, z. B. durch neue Einzelkomponenten im Motor, nachgewiesen und deren Haltbarkeit im Vorfeld für den konkreten Einsatz verifiziert werden, da die Einsatzsimulation am Prüfstand alle Nebeneinflüsse eliminiert und somit eine absolut reproduzierbare Prüflingsbelastung liefert.

In der Rundensimulation am Rennmotorenprüfstand muss deshalb der restliche Antriebsstrang, die Fahrdynamik des Gesamtfahrzeuges, die Strecke und der Fahrer durch ein entsprechendes mathematisches Modell simuliert werden. Zusätzlich muss die abgeführte Leistung an der Kurbelwelle in Form eines realen Drehmomentes passend mechanisch emuliert werden.

Dies stellt folgende Anforderungen an das mechatronische Gesamtsystem bestehend aus Motor, Wellenverbindung, Belastungsmaschine, Regelungseinheit und Simulationsmodell:

- Die Motorleistung muss ausreichend abgeführt werden können.
- Die Systemdynamik muss ausreichend hoch sein, sodass die im realen Fahrzeug maximal auftretenden Last- und Drehzahlgradienten einerseits simuliert, aber auch andererseits über entsprechende hochdynamische Belastungseinheiten real aufgeprägt werden können.

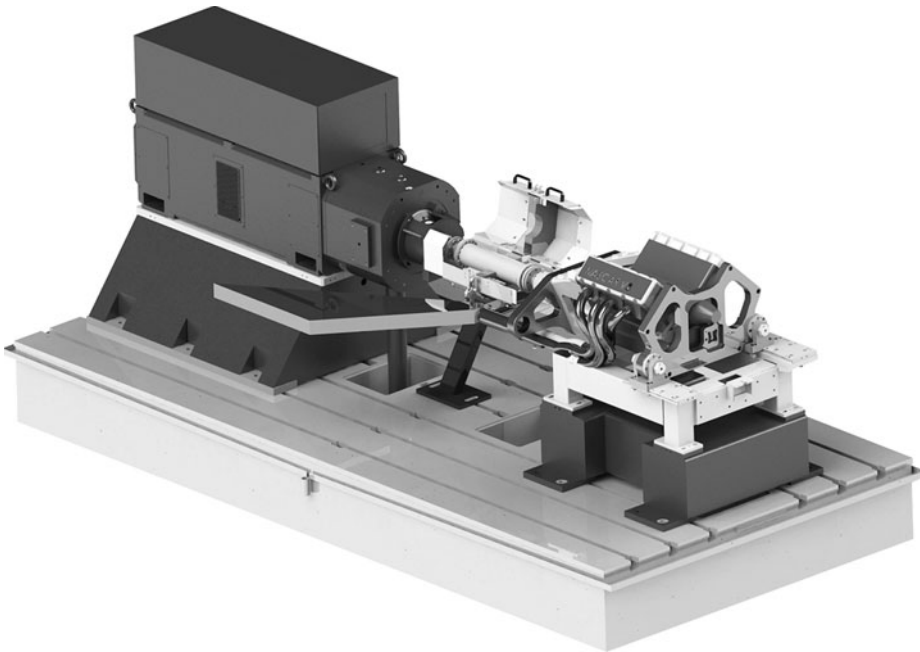
Gerade die letzte Forderung stößt an die Grenzen der momentan verfügbaren Prüftechnik. Mit aktueller Umrichtertechnologie und permanent erregten Synchronmaschinen sind Effekte bis ca. 500 Hz im geschlossenen Regelkreis (closed loop) bzw. bis 1200 Hz im offenen Regelkreis (open loop) darstellbar. Sowohl das torsionale als auch das lineare schädigungsrelevante Schwingungsverhalten eines Rennmotors liegen über dieser Grenzfrequenz. Deshalb müssen alle Phänomene entsprechend emuliert werden, die durch die Belastungsmaschine nicht direkt darstellbar sind. Dies wird beispielsweise für



das lineare Schwingungsverhalten durch spezielle adaptive Koppellemente im Motoraufspannsystem erreicht. Über eine geeignete Wellenverbindung kann das torsionale Eigenschwingungsverhalten des Motors passend eingestellt werden.

Die schwingungsmäßige Kopplung des Rennmotors im Fahrzeug erfolgt sehr drehsteif direkt an das angebaute Getriebe. Daher wird am Prüfstand die Ankopplung mit einer sogenannten Dummy Gearbox und einem entsprechend ausgelegten Drehstab, der die Massen- und Steifigkeitsverhältnisse des realen Motor-Getriebeverbundes nachstellt, durchgeführt und dadurch das korrekte Schwingungsverhalten nachgebildet. Abb. 2-77 zeigt einen solchen Aufbau mit Motoraufspannsystem, Dummy Gearbox und Wellenverbindung.

Moderne Rennsportgetriebe schalten ohne Zugkraftunterbrechung. In der Formel 1 wird sogar ohne Reduktion des Drehmomentes der Verbrennungskraftmaschine geschaltet. Dies ergibt eine außerordentliche Anforderung an die Prüfeinrichtung während der Gangschaltsimulation, wobei für alle anderen Betriebsarten die elektrische Belastungsmaschine leistungsmäßig nur leicht über der Verbrennungskraftmaschine liegen muss. Da der Gangschaltvorgang nur den Bruchteil einer Sekunde dauert, werden die Prüfsysteme mit einer hohen Überlast ausgelegt, die elektrisch größtenteils aus einem Zwischenkreis gespeist wird, um die notwendige Anschlussleistung an das Netz entsprechend gering zu halten. Kennwerte zur Auslegung der Belastungseinheiten für die Formel 1 sind daher 800 kW nominale Maschinenleistung, jedoch mit mehr als der doppelten Leistung als kurzfristige Überlast.



**Abb. 2-77** Motorprüfstand für Rennsportanwendungen

### 2.6.2 Komponentenprüfstände im Rennsport

Komponentenprüfstände im Rennsport haben eine sehr große Bedeutung, die sich hauptsächlich aus den Reglements der einzelnen Motorsportklassen ableiten lässt. Reglementierende Organisationen im Rennsport, wie FIA oder NASCAR, verfolgen das Ziel, eine für die Zuschauer interessante Rennsportveranstaltung zu organisieren. Grundvoraussetzung dafür ist ein Wettbewerb mit möglichst vielen Teilnehmern auf möglichst gleichem Niveau.

Dazu wird aus zweierlei Gründen das technische Reglement festgelegt:

- Technische Vorteile sollen unterbunden werden, die zu einer Dominanz einzelner Teams auf der Rennstrecke führen können.
- Das im Mindestfall notwendige Budget für ein wettbewerbsfähiges Fahrzeug soll in einem Rahmen bleiben, der es genügend Teams erlaubt, bei der entsprechenden Rennserie über einen bestimmten Zeitraum anzutreten. Dabei muss es den besten Teams möglich sein, mit den Einnahmen aus Preisen, Sponsoring und Merchandising ein erfolgreiches Unternehmen zu führen.

Aus diesen Gründen werden immer wieder einzelne Komponenten, Materialien und Technologien aus den individuellen Regelwerken ausgeschlossen. Komponenten, bei denen eine gewisse Freiheit in deren Entwicklung zugelassen ist und deren strukturelle bzw. funktionale Verbesserung einen Wettbewerbsvorteil im Rennen bringt, wandern naturgemäß in den Entwicklungsfokus der Teams. Zudem können Optimierungspotenziale einzelner Komponenten am Vollmotorprüfstand auf Grund der nicht zur Verfügung stehenden speziellen Sensorik und schweren Zugänglichkeit einzelner Messstellen nicht aufgedeckt werden. Schlussendlich spielt auch die Kostenoptimierung bei der Komponentenentwicklung eine große Rolle. Daraus ergibt sich ein steigender Bedarf an Komponentenprüfständen im Rennsportbereich.

Gerade die zunehmende Elektrifizierung der Rennsportklassen treibt auch die Entwicklung im Bereich der Elektro- und Hybridtechnologien an. Die Forderungen nach höchsten Leistungen bei niedrigster Masse und kleinster Bauform treiben die technologischen Entwicklungen in eine entsprechende Richtung. Direkter Nutzen für die Automobilindustrie ist nicht unmittelbar gegeben, da sowohl Haltbarkeit als auch kostengünstige Fertigung im Hintergrund stehen. Dennoch waren es nicht selten Technologien im Motorsport, die eine Vorreiterrolle für Serienentwicklungen einnahmen. Beispiele hierfür sind aktive Fahrwerke oder die Traktionskontrolle. Man kann davon ausgehen, dass sich auch bei der Elektrifizierung grundsätzliche Erkenntnisse mit passender Überarbeitung in den Serienfahrzeugen von morgen wiederfinden werden.

Beispielsweise erlaubt es das Reglement der Formel 1 mit Wirksamkeit für die Saison 2014 neben der Nutzung eines Elektromotors zur punktuellen Leistungserhöhung bzw. Energierückgewinnung während Bremsvorgängen auch einen elektrischen Antrieb am Turbolader zu verwenden.

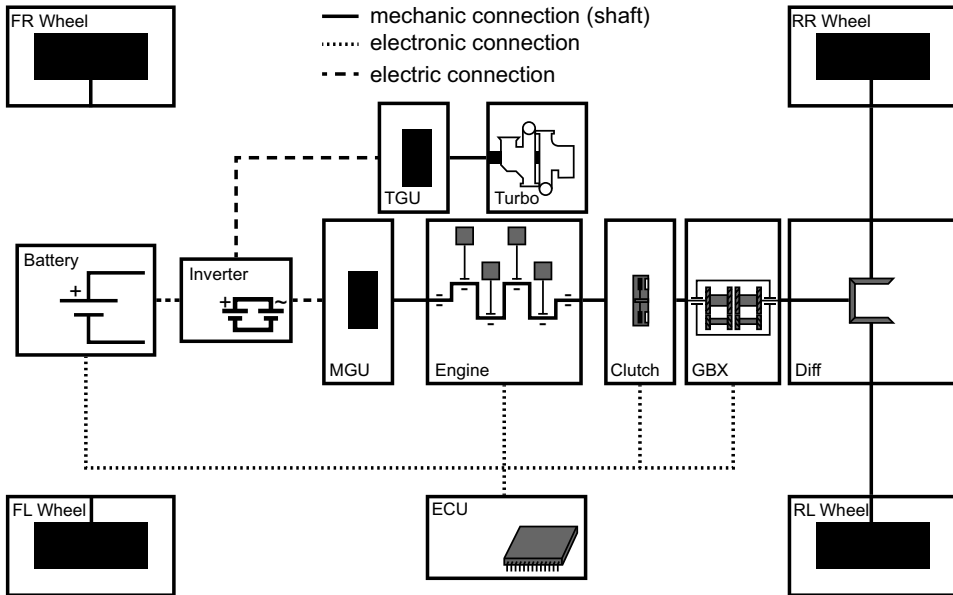


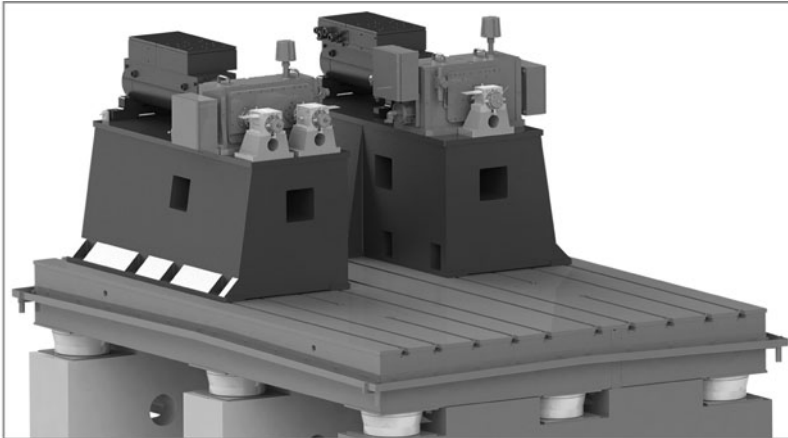
Abb. 2-78 Formel-1-Hybridtechnologie

Dies hat mehrere Vorteile:

- Der Turbolader kann entsprechend groß gebaut und für optimale Vollast ausgelegt werden. In der Teillast bzw. vor allem im Lastwechsel bringt der Elektromotor den Turbolader auf Drehzahl und vermeidet durch einen kurzen Energieschub das Turbo-Lock. Es entfällt die Notwendigkeit eines Bypassventils (Wastegate) bzw. eines Pop-Off Ventils zur Ladedruckregelung, da der elektrische Antrieb diese Regelung am Turbolader übernimmt. Diese Maßnahme erhöht den thermodynamischen Wirkungsgrad der Verbrennungskraftmaschine und gewinnt gleichzeitig elektrische Energie.
- Des Weiteren kann der elektrische Antrieb am Turbolader Leistung aus dem Abgasmassenstrom gewinnen und gleichzeitig wieder als mechanische Leistung an der elektrischen Maschine, die direkt mit der Kurbelwelle gekoppelt ist, in den Antriebsstrang einbringen. Obwohl diese Maßnahme den Abgasgegendruck und damit die Verbrennungsleistung reduziert und auch die elektrische Wandlung nicht verlustfrei ist, ergibt dieses Vorgehen ein Optimum an Summenantriebsleistung in den Antriebsstrang.

Aus diesen Überlegungen heraus wird die Notwendigkeit des Komponententests mehr als deutlich. Vor allem um die Prüfung des an den Turbolader gekoppelten Elektromotors realistisch darzustellen, bedarf es komplexer Simulationsmodelle, denn die Turboladerdrehzahl wird durch das vom Elektromotor wirkende Drehmoment und den Abgasmassenstrom bestimmt. Der Abgasmassenstrom hängt dabei wiederum vom Ladedruck (= Laderdrehzahl) und der Verbrennung ab. Damit erhält man sofort ein implizit geschlossenes System, das zumindest die thermo- und gasdynamischen Komponenten des Turboladers, der Saugstrecke, des Zylinders und der Abgasstrecke beinhaltet.

Abb. 2-78 und Abb. 2-79 zeigen jeweils die Topologie der aktuellen Hybridtechnologie der Formel 1 und einer entsprechenden Prüfeinrichtung, um beide elektrische Antriebe in diesem Konzept mit integrierter Motorsimulation zu prüfen.



**Abb. 2-79** Formel-1-Hybridprüfstand

## 2.7 Abgasprüfstände

### 2.7.1 Übersicht

Bei der Entwicklung neuer Motoren und Fahrzeuge müssen erhebliche Anstrengungen unternommen werden, um die Umweltverträglichkeit dieser sicherzustellen. Dazu gehört die Einhaltung der gültigen Emissions-, Klimagas- und Kraftstoffverbrauchsvorschriften des jeweiligen Landes. Diese Vorschriften, Regeln und Gesetze werden vom Gesetzgeber vorgegeben und beschreiben, welche Emissionsgrenzwerte einzuhalten sind und wie das Testen, Messen und Berechnen der Endergebnisse zu erfolgen hat. Ohne dies zu erfüllen, kann kein Motor oder Fahrzeug verkauft werden (Typfreigabe). Hinsichtlich Klimagas oder Verbrauch gelten Flottenverbrauchsvorgaben. Werden diese überschritten, müssen Kompensationszahlungen geleistet werden.

Im folgenden Kapitel werden die prinzipiellen Abgasprüfstände und Abgasanalysemethoden dargestellt, wie sie in der Entwicklung und Zertifizierung (Typfreigabe) im Hinblick auf Emissionen und Kraftstoffverbrauch eingesetzt werden.

### Abgasgesetzgebung

Der US-Bundesstaat Kalifornien gilt mit der Einführung von Emissionsprüfzyklen im Jahre 1966 als die Wiege der Abgasgesetzgebung. Seit diesem Zeitpunkt sind die Richtlinien zur Begrenzung von Emissionen sukzessive weiterentwickelt worden. Hauptschrittmacher sind dabei die drei Wirtschaftsräume USA, Europa und Japan. Die meisten anderen Länder folgen der europäischen Gesetzgebung, die durch die UNECE (Kom-

mission der Vereinten Nationen zur Wirtschaftsförderung in Europa) verwirklicht wird. Vereinzelt werden die gesetzlichen Regelungen dieser drei Wirtschaftsräume auch kombiniert angewandt, wie beispielsweise in Südkorea, Brasilien und zukünftig möglicherweise auch in China.

Die meisten gesetzlichen Bestimmungen berücksichtigen folgende Emissionsquellen:

- Emissionen, die aus dem Auspuff stammen (Verbrennungsmotor und Abgasnachbehandlung)
- Emissionen, die aus dem Motorkurbelgehäuse austreten
- Kraftstoffverdunstung aus dem Tank

Abhängig von der jeweiligen lokalen Gesetzgebung müssen diese Schadstoffgrenzwerte unter verschiedenen Bedingungen eingehalten werden:

- Niedrige Temperaturen ( $-7\text{ °C}$ ), Umgebungstemperaturen ( $20\text{ °C}$  bis  $30\text{ °C}$ ) und hohe Temperaturen ( $+35\text{ °C}$ )
- Verschiedene Geschwindigkeitsprofile, die unterschiedliche regionale Verkehrsbedingungen abbilden
- Verschiedene Höhenlagen

Die Kernelemente einer effektiven Abgasgesetzgebung sind:

- Feststellung der maximalen Emissionen bei einem Prototyp Fahrzeug (Typprüfung)
- Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte auf Dauerhaltbarkeit (z. B. in Europa für 160.000 km)
- Statistische Überprüfung der Abgase in der Produktion (Conformity of Production, COP)
- Selbsterkennung eines Ausfalls von einzelnen abgasreduzierenden Systemen und Sensoren im Fahrzeug (On-Board-Diagnosesystem, OBD)
- Reguläre Überprüfungen des Fahrzeugzustandes eines jeden im Feld befindlichen Fahrzeuges
- Moderne Gesetzgebungen überprüfen auch die Einhaltung von vorgegebenen Grenzwerten im realen Straßenverkehr (Real Driving Emissions oder In-Service Anforderungen)
- Vorgabe des Qualitätsstandards für den verkauften Kraftstoff

Folgende Schadstoffe werden aufgrund ihrer negativen Einflüsse auf die Gesundheit und Umwelt begrenzt:

- Unverbrannte Kohlenwasserstoffe werden als THC (Total Hydrocarbon Emissions), NMHC (Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe) oder  $\text{CH}_4$  (Methan) reguliert.
- Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) sind verantwortlich für die Entstehung von Smog und saurem Regen, und in Form von  $\text{NO}_2$  gesundheitsgefährdend.
- Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) beeinträchtigt als starkes Atemgift den Sauerstofftransport im menschlichen Körper.
- Partikel können Atemwegserkrankungen und Krebs verursachen. Daher werden sie entweder nach ihrer Masse (PM) oder zusätzlich auch nach ihrer Anzahl (PN) limitiert.

- Klimagase werden aufgrund ihres negativen Einflusses auf das Klima limitiert. Die Abgaskomponente ist hierbei Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), das bei jeder Verbrennung von fossilem Kraftstoff entsteht. Manchmal werden auch Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$  bzw. Lachgas) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) limitiert.
- Einige Abgaskomponenten werden abhängig von Kraftstoff oder Abgasnachbehandlungssystemen zusätzlich limitiert. Das sind beispielsweise Formaldehyde und Alkohol bei der Verwendung von Bio-Kraftstoffen oder Gemischen in den USA, oder Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) bei der Verwendung von SCR-Abgasnachbehandlungssystemen (Selective Catalytic Reduction).

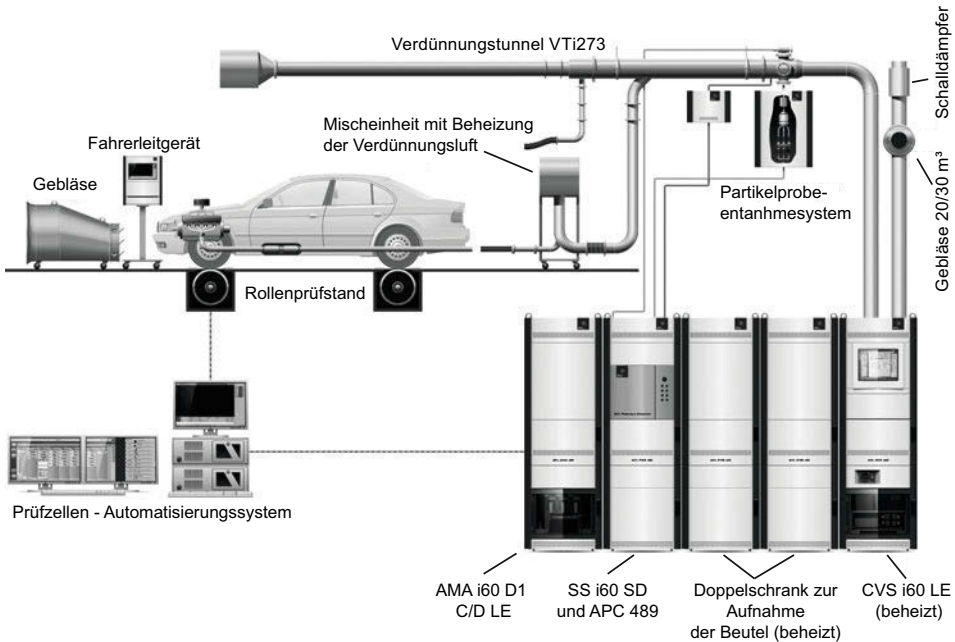
### Prüflinge

Mittlerweile gibt es Abgasvorschriften für fast jede Anwendung eines Verbrennungsmotors; angefangen von Kleinstmotoren, wie sie z. B. in Kettensägen verbaut werden, über jegliche Art von Kraftfahrzeugen: vom Moped bis zum schweren Nutzfahrzeug sowie Landwirtschafts- und Baumaschinen, Eisenbahnen, Schiffen und Industriegroßmotoren. Diese Vielzahl an Anwendungen wird prinzipiell in drei Kategorien eingeteilt.

- „Light Duty“-Fahrzeuge: Sie sind primär zum Transport von Menschen gedacht, angefangen von Zwei- und Dreirädern, bis hin zu Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen. In dieser Kategorie wird immer das komplette Fahrzeug betrachtet und geprüft. Die Prüfung erfolgt am Rollenprüfstand und die Abgasgrenzwerte werden als Abgasmasse pro Wegstrecke festgelegt (g/km oder g/mi).
- „Heavy Duty“-Nutzfahrzeuge: Diese Gruppe umfasst beispielsweise Lastkraftwagen und Busse. Bei diesen Fahrzeugen werden immer nur der Motor und das Abgasnachbehandlungssystem betrachtet und geprüft. Die Prüfung erfolgt am Motorenprüfstand und die Abgasgrenzwerte werden als Abgasmasse pro geleistete Arbeit festgelegt (g/kWh).
- „Non-Road“-Maschinen: Darunter versteht man die breite Palette von allen Motoranwendungen, die nicht zum Straßentransport gedacht sind, wie Kettensägen, Rasenmäher, Notstromaggregate, Bagger, Schneemobile, Baumaschinen, landwirtschaftliche Fahrzeuge und Maschinen, Zugmotoren, Schiffantriebe bis hin zu großen Industriemotoren für die Stromerzeugung. Für diese Fahrzeuge und Maschinen werden immer nur der Motor und das Abgasnachbehandlungssystem betrachtet und geprüft. Die Prüfung erfolgt am Motorenprüfstand und die Abgasgrenzwerte werden als Abgasmasse pro geleistete Arbeit festgelegt (g/kWh).

### 2.7.2 Abgasprüfung für PKW am Rollenprüfstand

Krafträder (Zwei- und Dreiräder), Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge werden grundsätzlich auf Rollenprüfständen zertifiziert. Dabei geht es darum, die ausgestoßene Menge an Schadstoffen zu messen. In der Regel wird dabei ein Kaltstart mit anschließender Fahrt simuliert. Die Fahrwiderstände, wie sie auf der Straße auftreten, werden durch den Rollenprüfstand simuliert, wodurch eine realistische Straßenfahrt nachgestellt werden kann.

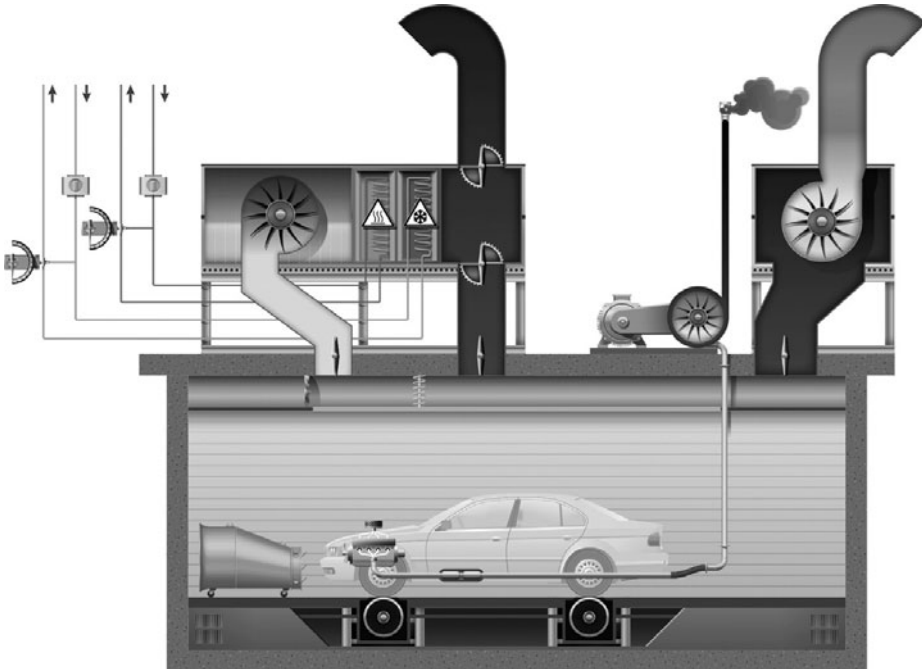


**Abb. 2-80** Schaubild eines Rollenprüfstandes mit CVS-Abgasverdünnungssystem für Diesel- und Benzin-Fahrzeuge

### Herausforderungen

Die höchsten Emissionen stößt ein modernes Fahrzeug mit Abgasnachbehandlung während der ersten Sekunden (10–30 sec) nach dem Start aus, da das Abgasnachbehandlungssystem erst effektiv wird, wenn die Abgastemperatur einige 100 °C erreicht hat. Ab diesem Zeitpunkt werden die Emissionen, die vom Motor stammen, bis zu 98 % reduziert. Deswegen wird die Prüfung so durchgeführt, dass auch der Start des Fahrzeuges mitgemessen wird. Dabei muss das Fahrzeug zuvor mindestens sechs Stunden ungestartet bei einer Umgebungstemperatur zwischen 20 °C und 30 °C stehen.

Sobald das Abgasnachbehandlungssystem seine Mindestbetriebstemperatur erreicht hat, stößt das Fahrzeug nur noch sehr niedrige Werte an Schadstoffen, jedoch kontinuierlich Klimagase, aus. In stark verschmutzten Umgebungsbedingungen kann es vorkommen, dass im Abgas weniger Schadstoffe als in der Luft, die vom Motor angesaugt wurde, enthalten sind. Diese werden entweder mitverbrannt oder auch durch die Abgasnachbehandlung beseitigt. Solch niedrige Emissionen sind natürlich eine herausfordernde Aufgabe für die Messsysteme, die neben hochpräzisen Analysesystemen auch eine ausgeklügelte Integration der beteiligten Prüfstandskomponenten sowie eine dementsprechende Bedienung und Wartung des Prüfstandes erfordert.



**Abb. 2-81** Rollenprüfstand mit Klimatisierung

### Workflow

Ein Rollenprüfstand (Abb. 2-81) muss so konzipiert sein, dass er ca. einen Fahrzeugtest pro Stunde ermöglicht. Da der Prüfling das Gesamtfahrzeug ist und die Adaptierung an den Prüfstand schnell erfolgen kann (d. h. Abgassammelleitung an den Auspuff anschließen, das Fahrzeug auf den Prüfstand schieben, ausrichten und festhängen), können viele verschiedene Fahrzeuge hintereinander getestet werden. Das bedeutet, dass alle fahrzeug- und prüflaufbezogenen Informationen, wie beispielsweise Testparameter, angeschlossene Aggregate, vorgeschriebenes Fahrprofil, Kalibrierungsdaten etc., dem Prüfstandsbediener sofort zur Verfügung stehen müssen. Durch einen hohen Automatisierungsgrad des gesamten Prüfzentrums können hocheffiziente Testläufe verwirklicht und eine entsprechende Produktivität des Investments sichergestellt werden.

### Simulationseigenschaften von Prüfständen

Die Aufgabe des Prüfstandes ist es, die Simulation der folgenden Fahrzustände zu ermöglichen:

- Der Fahrer folgt einem definierten Fahrzyklus mit vorgegebener Geschwindigkeit über einen festgelegten Zeitraum. Dabei muss er sicherstellen, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit innerhalb eines bestimmten „Korridors“ bleibt.
- Ein Rollenprüfstand simuliert die Motorlast, welcher der Motor auf der Straße ausgesetzt wäre: Rollwiderstände, Luftwiderstände und die Last, um das Fahrzeug zu beschleunigen.



- Ein Gebläse simuliert die vor dem Fahrzeug herrschende Windgeschwindigkeit für eine realistische Reproduktion der Straßenbedingungen im Hinblick auf die Motor-  
kühlung. Der Luftwiderstand des Fahrzeuges wird über die Rolle simuliert.
- Eine Klimatisierung des Prüfstandes sorgt für gesetzeskonforme Temperatur- und  
Luftfeuchtigkeitsregelung. Üblicherweise sind die Temperaturen für einen Abgastest  
im Bereich von 20 bis 30 °C, womit oft auch eine einfache Klimatisierung möglich  
ist. Für die neue europäische Gesetzgebung werden jedoch 23 °C als Solltemperatur  
vorgeschrieben, und Abweichungen werden nur als Schwankungen um diesen Soll-  
wert akzeptiert. Damit benötigen nun alle Prüfstände eine volle Klimatisierung. Dar-  
über hinaus wird in einigen Gesetzen auch die Abgasmessung bei niederen Tempera-  
turen (z. B. 10 °C und –7°C) oder bei einer höheren Temperatur inklusive der Simula-  
tion der Sonneneinstrahlung durchgeführt (z. B. für die USA), um das Abgasverhalten  
bei Fahrzeugen mit Klimaanlage zu überprüfen.

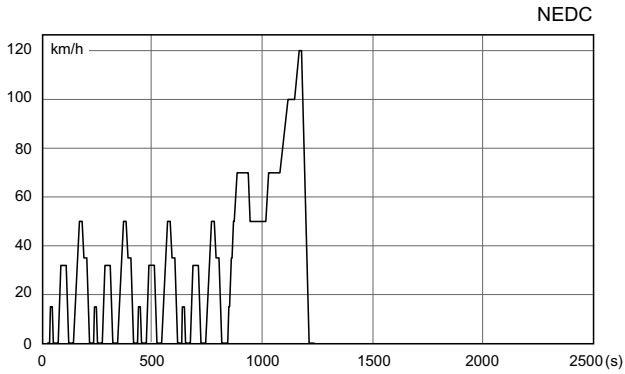
### **Vorbereitung des Fahrzeugs**

Die eigentliche Messung der Abgasemissionen wird durchgeführt, nachdem das Fahr-  
zeug in einen definierten Ausgangszustand gebracht wurde:

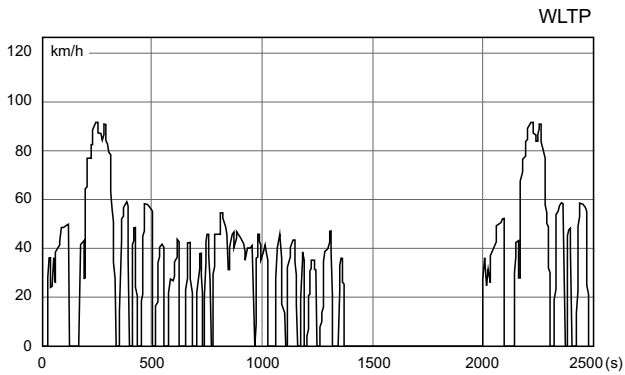
- Das Fahrzeug wird mit einem genau definierten Kraftstoff in festgelegter Menge  
betankt. Dieser Schritt ist auch bei der Vorbereitung von Messungen der Verduns-  
tungsemissionen notwendig.
- Der Rückhaltebehälter für Kraftstoffdämpfe wird aufgefüllt.
- Das Fahrzeug wird bereits einige Kilometer gefahren, sodass alles entsprechend ein-  
gelaufen ist. Vor der Messung werden zur Vorkonditionierung genau definierte Prüf-  
zyklen am Rollenprüfstand gefahren.
- Unmittelbar vor der Prüfung wird das Fahrzeug bei einer Mindesttemperatur von  
20 °C bis 30 °C (in Europa in Zukunft bei 23 °C) konditioniert. In dieser Zeit ist es  
nicht erlaubt, Änderungen am Fahrzeug vorzunehmen oder die Zündung einzuschal-  
ten. Die Zündung darf erst beim unmittelbaren Start im Test aktiviert werden. Durch  
das Einschalten der Zündung würde die Benzinpumpe anlaufen und demzufolge  
könnten die Startemissionen anders sein, als wenn die Benzinleitung nicht ganz voll  
ist, wie es im realen Leben bei einem Start in der Früh der Fall sein könnte.

### **Durchführung des Abgastests**

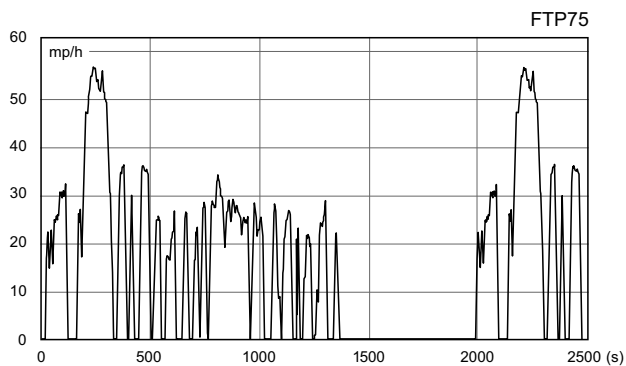
Bereits der Start des Fahrzeuges ist Teil des Abgastests. Der Fahrer (oder Roboter) fährt  
das Fahrzeug gemäß dem im Gesetz vorgegebenen Fahrzyklus, der einer durchschnittli-  
chen Fahrt entsprechen soll und ein Geschwindigkeitsprofil über der Zeit darstellt. Nach  
der europäischen Abgasgesetzgebung wird der NEDC-Messzyklus (New European  
Drive Cycle), der ab 2017 durch den WLTP-Messzyklus (Worldwide Harmonized Light  
Duty Test Procedure) ersetzt werden wird, und für die US-Abgasgesetzgebung der FTP-  
75-Messzyklus (Federal Test Procedure von 1975) angewandt (siehe Abb. 2-82 bis Abb.  
2-84). Wie gut und realistisch das Nachfahren durchgeführt werden muss, ist zum Teil  
definiert (z. B. wie das Gaspedal bewegt werden soll), es gibt aber auch minimale er-  
laubte Abweichungen.



**Abb. 2-82** Europäischer Fahrzyklus (NEDC), Länge: 11,007 km, Dauer: 1180 s, Mittlere Geschwindigkeit: 34 km/h, Höchstgeschwindigkeit: 120 km/h, Anzahl der Phasen: 2



**Abb. 2-83** Worldwide Harmonized, Light Duty Test Procedure (WLTP, Class-3a), Länge: 23,2 km, Dauer: 1800 s, Mittlere Geschwindigkeit: 46 km/h, Höchstgeschwindigkeit: 125 km/h, Anzahl der Phasen: 4



**Abb. 2-84** US-Fahrzyklus (FTP-75), Länge: 17,77 km, Dauer: 2474 s, Mittlere Geschwindigkeit: 34,1 km/h, Höchstgeschwindigkeit: 91 km/h, Anzahl der Phasen: 3

Während der gesamten Testdurchführung (Ausnahme bildet eine 10-minütige Soak-Pause beim FTP-75 Test) läuft die Abgasmessung kontinuierlich und ermittelt, welche Gesamtmassen der einzelnen Schadstoffe während des Tests emittiert werden. Diese Gesamtmassen werden dann auf die zurückgelegte Wegstrecke bezogen und als g/km oder g/Meile ausgegeben (oder als Partikelanzahl/km). Der verbrauchte Kraftstoff wird als l/100km, km/l oder mpg (Miles per Gallone) ermittelt. Eine direkte Verbrauchsmessung im Kraftstoffsystem ist für die Fahrzeugzertifizierung nicht zulässig, da ein in der Kraftstoffleitung fließender Kraftstoff nicht verbrannt wird. Deshalb werden die gültigen Verbrauchswerte aus Abgasemissionen zurückgerechnet (C-Bilanz).

Für die Abgasmessung ist weltweit die CVS Methodik (Constant Volume Sampler) vorgeschrieben. In den USA wird zukünftig als Alternative auch die Messung mittels Teilstromverdünnung oder die Messung aus dem unverdünnten Abgas zulässig werden (CFR-1066). Diese Alternativen werden aber noch lange Zeit reine Alternativen und nur für die USA akzeptierbar bleiben. Weitere Details zur Abgasmessung sind im Kapitel Abgasmessung zu finden.

### Entwicklungsarbeit

Meistens wird ein Rollenprüfstand nicht nur für Zertifizierungsmessungen verwendet, sondern für Entwicklungs- und Fahrzeugkalibrieraufgaben. Dafür werden Rollenprüfstände mit zusätzlicher Messtechnik aufgerüstet:

- Mehr-Linien-Abgasmessanlagen: Diese Anlagen werden zur Messung von unverdünnten Abgaskonzentrationen vor und nach den Abgasnachbehandlungssystemen eingesetzt. Solche Messungen erfordern auch immer die Bestimmung der modalen Emissionen. Als modale Emissionen bezeichnet man die kontinuierliche Berechnung der einzelnen Emissionsmassen in g/s während des gesamten Tests.
- FTIR-Abgasmessanlagen (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer): Damit werden beispielsweise die Reduktionskomponenten aus der Harnstofflösung vor dem SCR-Abgasreinigungssystem (Selective Catalytic Reduction) gemessen oder eine Vielzahl an nicht limitierten Abgaskomponenten ermittelt. Dies geschieht entweder aus umwelttechnischer Sicht oder zum besseren Verständnis der Vorgänge im Motor oder der Abgasnachbehandlung.
- Zusätzliche Partikelmessgeräte: Dazu gehören beispielsweise Micro-Soot-Sensoren (MSS) und Trübungsmesser, um die Partikelemissionen besser verstehen zu können.

Für die Bestimmung von modalen Emissionen werden die Abgaskonzentrationen aus dem verdünnten Abgas bestimmt, was eine relativ einfache Methode darstellt. Für eine Bestimmung modaler Emissionen aus dem unverdünnten Abgas, wie es z. B. für eine Messung vor einem Abgasnachbehandlungssystem unumgänglich ist, wird es komplizierter. Dazu ist die kontinuierliche Bestimmung des Motorenabgasvolumens oder Massenstroms erforderlich. Die Emissionsmassen werden nach einer genauen zeitlichen Zuordnung mit dem Motorenabgasstrom und der jeweiligen Abgaskomponentendichte multipliziert. Zur Bestimmung des Motorenabgasvolumens oder Massenstroms gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- **CO<sub>2</sub>-Tracer-Methode:** In Zusammenhang mit einer CVS Anlage wird das Verdünnungsverhältnis der CVS mittels der CO<sub>2</sub>-Tracer-Methode bestimmt. Dabei wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration im unverdünnten Abgas mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im verdünnten Abgas verglichen und das Verdünnungsverhältnis berechnet. Aus der Durchflussrate der CVS (verdünntes Abgas) und dem Verdünnungsverhältnis wird der Abgasvolumenstrom berechnet. In Phasen, wo der Motor nicht läuft, wie Schubabschaltung, Start/Stop-Automatik oder bei Hybridfahrzeugen, emittiert der Motor kein CO<sub>2</sub> und somit ist die Tracer-Methode in diesen Zeiten nicht anwendbar.
- Zusammen mit einer CVS Anlage kann durch eine zusätzliche Messung des Durchflusses der Verdünnungsluft in die CVS auch der Abgasstrom vom Motor bestimmt werden, der sich aus der Differenz von CVS Gesamtdurchfluss und Verdünnungsluftzufluss ergibt. Diese Differenzbildung zweier relativ großer Messwerte zur Berechnung eines relativ kleinen Wertes kann durch Fehlerfortpflanzung schnell zu großen Fehlern führen.

Vorteilhafter als die oben genannten indirekten Messmethoden wäre eine direkte Messung des Abgasstroms des Motors. Solche Methoden sind teilweise am Motorenprüfstand üblich, aber weniger am Rollenprüfstand, oder sie sind von den Messsystemen her nicht genau oder robust genug. Weitere Messmethoden sind:

- **Ansaugluft und Kraftstoffverbrauch:** Diese dem Motor zugeführten Massen treten auch aus dem Motor wieder aus und werden durch die Verbrennung nicht verändert (Massenerhaltung). Dies ist zwar die Standardmethode am Motorenprüfstand, sie ist aber wegen der eher aufwendigen Applizierung im Gesamtfahrzeug am Rollenprüfstand nicht in Verwendung.
- **Ansaugluft und Luft-/Kraftstoffverhältnis (Lambda) der Verbrennung:** Diese Methode ist eher unüblich und auch eher schwer am Fahrzeug zu applizieren.
- **Kraftstoffverbrauch und Luft-/Kraftstoffverhältnis (Lambda) der Verbrennung:** Auch diese Methode ist eher unüblich, da sie wie die oben erwähnten auch eher schwer am Fahrzeug zu applizieren ist.
- **Abgasdurchfluss-Signal aus der Motorsteuerung:** Diese Methode findet im Bereich der mobilen Messtechnik auf der Straße Anwendung, aber nicht auf Prüfständen. Zusätzlich bedarf sie auch auf der Straße der Überprüfung mittels einer Prüfstandsmethode, um die Genauigkeit zu verifizieren.
- **Direkte Abgasdurchflussmessung am Auspuff:** Dies ist die optimale Methode am Rollenprüfstand und wird vereinzelt auch angewandt. Genauigkeit, Robustheit und Kosten der momentan verfügbaren Systeme sind aber noch nicht so ausgereift, dass es zu einer weiteren Verbreitung gekommen ist.

## Hybridfahrzeuge

Hybridfahrzeuge können für die Abgasmessung in zwei Klassen eingeteilt werden. Die erste Klasse umfasst Fahrzeuge ohne externe Lademöglichkeit der Batterie. Diese werden wie konventionelle Fahrzeuge getestet. Zusätzlich ist nur die Bestimmung des Ladezustandes (State of Charge, SOC) der Batterie erforderlich. Ist der Ladezustand vor und nach der Messung identisch, werden die Messergebnisse herangezogen, wie sie tatsächlich gemessen wurden. Ist der Ladezustand nach der Messung unterschiedlich, wird

dieser Unterschied mathematisch in die Ergebnisse miteingerechnet. Enthält die Batterie nach dem Test z. B. weniger Energie als vor dem Test, wird der Verbrauch mathematisch hochgerechnet, da die Batterie irgendwann wieder aufgeladen werden muss. Dies erfolgt bei solchen Fahrzeugen durch das Fahren und damit wird Kraftstoff verbraucht.

Die zweite Klasse beinhaltet Hybridfahrzeuge, die auch extern geladen werden können, oft als Plug-in-Hybrid bezeichnet. Solche Fahrzeuge sind deutlich komplexer und mit erheblichem Mehraufwand zu testen. Die gesetzlichen Bestimmungen schreiben zusätzliche Messungen vor:

- Ermittlung der Reichweite, die im rein elektrischen Betrieb erreicht werden kann
- Ermittlung der elektrischen Energiemenge, mit der die Batterie nachgeladen werden muss, nachdem die gesamte rein elektrische Fahrstrecke befahren wurde
- Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs bei voller und leerer Batterie
- Ermittlung der Emissionen, wobei bei allen Tests immer die Grenzwerte eingehalten werden müssen, egal ob mit voller oder leerer Batterie

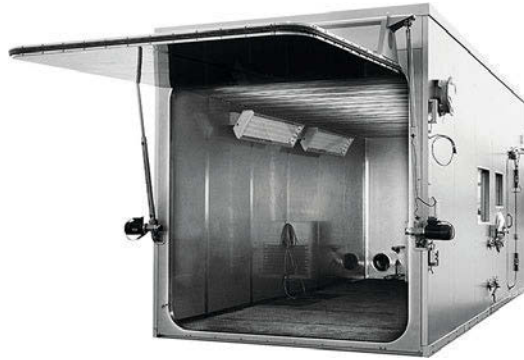
Für die Messung an Hybridfahrzeugen sind zur Ermittlung der Energiebilanz der Batterie und zur Detektion der Ein-/Ausphasen des Verbrennungsmotors zusätzliche Geräte erforderlich. Die Integration zweier Motorkonzepte macht die Beachtung weiterer Regeln erforderlich, um bei allen denkbaren Betriebsbedingungen mit unterschiedlichen Anteilen der beiden Antriebe die ermittelten Messwerte nicht zu verfälschen.

### **Verdunstungsemissionen**

Neben den bekannten Abgasemissionen, die durch den Verbrennungsprozess entstehen und die aus dem Auspuff ausgestoßen werden, emittiert ein Fahrzeug auch Verdunstungsemissionen (evaporative emissions) aus dem Kraftstoffsystem. Speziell bei der Verwendung von Benzin, das schon bei Umgebungstemperaturen verdampfen kann, werden beim Aufwärmen des Tanks, z. B. durch Sonneneinstrahlung beim Parken, Kraftstoffdämpfe (THC) bei den verwendeten drucklosen Tanksystem an die Umwelt abgegeben. Ohne geeignete Gegenmaßnahmen (THC-Rückhaltesysteme oder Evap-Systeme) würden diese Emissionen deutlich höher sein als die THC-Emissionen am Auspuff bei modernen Fahrzeugen.

Zur Reduktion dieser Emissionen sind im Fahrzeug THC-Rückhaltesysteme eingebaut, wie beispielsweise Aktivkohlefilter. Diese halten bei dem aus dem Tank ausströmenden Luft-Kraftstoffdampf-Gemisch Kraftstoffdämpfe zurück und werden, wenn der Motor läuft, von Zeit zu Zeit in umgekehrter Durchflussrichtung gespült. Zusätzlich werden die zurückgespülten Kraftstoffdämpfe im Motor verbrannt. So gelangen sie nicht in die Umwelt und werden wieder als Kraftstoff dem Motor zugeführt. Dieser Beitrag zur Kraftstoffeinsparung entspricht gemäß einer Berechnung des deutschen Umweltbundesamtes ungefähr 6 bis 7 Litern Kraftstoff pro Jahr und Fahrzeug.

Bei der Fahrzeugabgasmessung ist das ein gleichbedeutender Teil der Abgasgesetzgebung. Bei der Messung werden zusätzlich auch THC-Emissionen von anderen Quellen mitgemessen, wie z. B. von Lacken, Unterbodenschutz, Schmierstoffen, Reifen, Kunststoffen oder Gummitteilen.



**Abb. 2-85** SHED Kammer (Sealed Housing for Evaporative Determination), in der die Verdunstungsemissionen eines Fahrzeuges gemessen werden

Ähnlich wie bei den Abgastests sind auch die qualitativen Verdunstungsemissionstests sehr vom Gesamtprozess der Fahrzeugkonditionierung (Konditionierdauer, Umgebungsbedingungen, Kraftstoffqualität etc.) abhängig und entscheidend für die Einhaltung der Grenzwerte, die in g/Test definiert sind.

Es kommen derzeit vier Prüfungsarten zum Einsatz, die auch immer in Zusammenhang mit Prüfläufen am Abgasrollenprüfstand erfolgen. Diese sind als Vor-Konditionierung für den anschließenden Verdunstungstest unumgänglich.

- Park-/Tagessimulation (DIURNAL): Das Fahrzeug wird für 24 Stunden abgestellt. Während dieser Zeit durchläuft die Temperatur des Kraftstoffes gewisse Zyklen.
- Heißabstellsimulation (HOT-SOAK): Das Fahrzeug wird nach dem Test (heißfahren) auf dem Rollenprüfstand abgestellt, wobei Abstellphase und Testdauer 1 Stunde betragen.
- Betankungstest (ORVR + Spitback): Betankungssimulation an der Tankstelle mit (aktiv) oder ohne (passiv) Gasrückführung
- Fahrsimulation (RUNNING-LOSS): Die Verdunstungsemissionen werden zeitgleich am Rollenprüfstand mit einem Abgastest bestimmt. Dazu ist der Rollenprüfstand in eine SHED-Kammer (Sealed Housing for Evaporative Determination) integriert (siehe Abb. 2-85). Alternativ kann man auf einem normalen Abgasrollenprüfstand auch eine sogenannte Point-Source-Methode verwenden, bei welcher die Emissionen nur an jenen Stellen des Fahrzeuges gemessen werden, an denen das Potential für Verdunstungsemissionen gegeben ist.

Für die Durchführung der Verdunstungsemissionstests werden entsprechende Testsysteme benötigt:

- SHED-Kammer, in der das Fahrzeug gemessen wird. Bei einer Messung wird in dieser gasdichten Kammer die Temperatur gemäß vorgegebener Profile verändert. Sie benötigt einen Volumenausgleich, um eine etwaige Druckerhöhung auszugleichen (VV/VT-SHED). Eine nicht realistische Druckerhöhung in der Kammer würde sonst den Verdunstungsprozess anders erscheinen lassen als in der Realität.
- Gasanalysesystem für die THC-Messung

- CANLOAD-System zur Konditionierung des im Fahrzeug eingebauten Aktivkohlefilters. Aus Effizienzgründen erfolgt die Konditionierung nicht im Fahrzeug, sondern außerhalb des Fahrzeuges.
- FUELLOAD zur Kraftstoffkonditionierung und als Betankungsanlage, um das Fahrzeug mit richtig temperiertem Benzin aufzutanken und den Betankungstest durchzuführen.
- RL-SHED-Kammer für den Fahrsimulationstest (RUNNING-LOSS). Dabei erfolgt die Integration von SHED und Rollenprüfstand.
- Point-Source-System als Alternative zu einer RL-SHED Kammer bei Verwendung eines normalen Rollenprüfstandes
- Automatisierungssystem

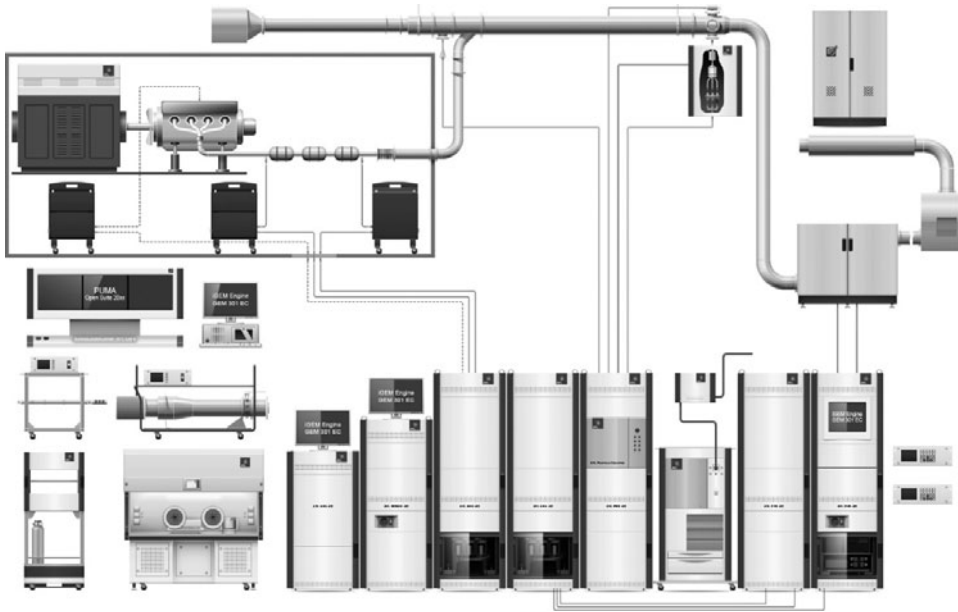
### 2.7.3 Abgasprüfung für Nutzfahrzeuge

Im Gegensatz zum PKW (als Gesamtfahrzeug getestet) werden bei mittleren und schweren Nutzfahrzeugen (LKW und Bussen) nur der Motor mit dem Abgasnachbehandlungssystem hinsichtlich der Einhaltung der Abgaslimits getestet und zertifiziert. Die Prüfung erfolgt am Motorenprüfstand und die Abgasgrenzwerte werden als Abgasmasse pro geleisteter Arbeit festgelegt (g/kWh).

#### Prüfstandsausstattung und Abgasmessmethoden

Für die Messung von Abgasemissionen können und dürfen zwei grundlegende Messmethoden verwendet werden. Die Methode der Vollstromverdünnung (CVS-Methode) verdünnt den gesamten Abgasmassenstrom mit der Umgebungsluft. Die Messung der gasförmigen Abgaskomponenten erfolgt im Normalfall aus Abgasbeuteln, in denen ein Teil des verdünnten Abgases während des Tests gesammelt wird, oder direkt und kontinuierlich im verdünnten Abgas. Bei der Prüfung von Dieselmotoren muss die Messung der Gesamt-Kohlenwasserstoffe (THC) und der Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) zwingend im verdünnten Abgas gemessen werden. Partikelemissionen (Masse und je nach Gesetz auch Anzahl) erfolgen auch immer aus dem verdünnten Abgas.

Eine zweite zulässige Methode ist die Bestimmung der gasförmigen Emissionen aus dem unverdünnten Abgas und der Partikelemissionen aus einem Teilstromverdünnungssystem. Dabei werden die Konzentrationen der gasförmigen Abgaskomponenten im unverdünnten Abgas gemessen und mittels Abgasmassenstrom des Motors, der im Allgemeinen aus Kraftstoffverbrauch und Ansaugluftmasse berechnet wird, die Massenemission rechnerisch ermittelt. Eine genaue zeitliche Zuordnung der einzelnen Messgrößen ist für dieses Berechnungsverfahren unumgänglich. Für die Messung von Partikelmasse und Partikelanzahl wird ein dem Abgasmassenstrom proportionaler Teilstrom aus dem Abgassystem des Motors entnommen, entsprechend verdünnt und durch den Partikelanalysefilter gesaugt bzw. zum Partikelzähler geleitet. Der Platz- und Energiebedarf dieser Teilstromverdünnung ist deutlich geringer, wenngleich die Steuerung der Verdünnung und Berechnung der Ergebnisse aufwändiger ist. Die Teilstromverdünnungsmethode ist von ihrer Anwendung her eher einer unverdünnten Messung ähnlich als einer Vollstromverdünnungsmethode.



**Abb. 2-86** Nutzfahrzeugmotorenprüfstand mit Messsystem zur Rohabgasanalyse und verdünnter Abgasmessung

### Testzyklus

Die Abgasprüfung wird gemäß der derzeit gültigen Richtlinien entweder nur im transienten Motortestlauf durchgeführt oder, wie z. B. in Europa, sowohl in stationären als auch zusätzlich in transienten Testläufen. Transiente Tests werden zweimal durchgeführt: einmal mit einem Kaltstart des Motors und einmal mit einem Heißstart, wobei die beiden Ergebnisse gewichtet gemittelt werden. Die verwendeten Drehzahl- und Lastprofile werden in normierter Form vom Gesetz vorgegeben und mit Hilfe der Volllastkurve des zu prüfenden Motors in ein dem Prüfling angepasste Drehzahl- und Drehmomentprofil umgerechnet.

Die derzeit wichtigsten Testläufe sind:

- WHTC (World Heavy Duty Transient Cycle) gemäß UN-ECE GTR-4: zwei Phasen zu je 1800 Sekunden mit 10 Minuten Pause zwischen den Phasen
- WHSC (World Heavy Duty Stationary Cycle) gemäß UN-ECE GTR-4: 13 verschiedene Betriebspunkte, gesamt 1895 Sekunden
- USHDTC (US Heavy Duty Transient Cycle) gemäß 40 CFR Pt.86: zwei Phasen zu je 1200 Sekunden mit 20 Minuten Pause zwischen den Phasen. Es gibt verschiedene Testprofile für Otto- und Dieselmotoren.

Zur Umrechnung des als Prozentzahl von einem Bezugswert definierten Solldrehzahl- und Solldrehmomentverlaufs wird die jeweils aktuelle Volllastkurve des Motors herangezogen. Mit Hilfe der verschiedenen Kenngrößen dieser Volllastkurve lässt sich das normierte Fahrprofil in einen Drehzahl-/Drehmomentverlauf umrechnen. Nach Ende



jeder Phase werden die Soll- und Istwerte von Drehzahl, Drehmoment und Leistung statistisch mittels Regressionsanalyse beurteilt. Dadurch kann festgestellt werden, ob der Motor während des Tests entsprechend der Vorgaben in der Richtlinie betrieben wurde und ob der Test gültig oder ungültig ist.

### **Prüfablauf Zertifizierungstest**

Allen genannten Prüfzyklen haben den folgenden grundlegenden Prüfablauf für die Emissionszertifizierung gemeinsam:

- Volllastkurvenaufnahme
- Motor- und Abgassystemkonditionierung (in der Regel mehr als 6 Stunden)
- Konditionierung auf Starttemperatur (Motorstillstand)
- Kaltstarttest (Starttemperatur 25 °C)
- Pause
- Heißstart

### **2.7.4 Abgasprüfung für Non-Road Motoren**

Bei Fahrzeugen, die nicht für den Einsatz auf der Straße konzipiert sind, wird wie bei den mittleren und schweren Nutzfahrzeugen grundsätzlich nur das Abgasverhalten der Motoren und deren Abgasnachbehandlungssysteme betrachtet. Die Prüfung erfolgt am Motorenprüfstand und die Abgasgrenzwerte werden als Abgasmasse pro geleisteter Arbeit festgelegt (g/kWh).

Unter dem Begriff Non-Road Motoren (oft auch als Off-Road Motoren bezeichnet) werden Verbrennungsmotoren unter anderem für folgende Anwendungen zusammengefasst:

- Traktoren
- Selbstfahrende Arbeitsmaschinen (z. B. Bagger)
- Stationäre Stromgeneratoren (aller Größen)
- Rasenmäher, Kettensägen und andere tragbare/handgeführte Geräte
- Motoren für Motorschlitten und andere Freizeitfahrzeuge
- Schiffsmotoren in allen verschiedenen Größen
- Lokomotiven

Aufgrund dieser unterschiedlichen Anwendungen für Non-Road Motoren ergeben sich zum Teil völlig verschiedene Drehzahl-/Lastbereiche, in denen die Motoren betrieben werden. Es ist daher wenig verwunderlich, dass sich sowohl die Prüfzyklen als auch die Prüfstände entsprechend der sehr unterschiedlichen Motorgrößen unterscheiden.

### **Prüfstandsausstattung und Messmethoden**

Zur Prüfung dieser Motorenkategorie – mit Ausnahme von Klein- und Kleinstmotoren – werden im Allgemeinen Prüfstände eingesetzt, deren Abgasmesstechnik auf Rohabgasmessung für gasförmige Emissionen und Teilstromverdünnung für Partikelmasse basiert. Bei der Prüfung von Klein- und Kleinstmotoren kommt wiederum die CVS-Messtechnik

zum Einsatz. Als Gründe hierfür stehen aber eher die Vermeidung von Kontaminierung des Messsystems und die Minimierung des Einflusses auf das Messobjekt im Vordergrund.

### **Testzyklen**

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Nutzungscharakteristika der verschiedenen Anwendungen sind grundsätzlich folgende Arten von Testzyklen zu unterscheiden:

Stationäre Zyklen bestehen aus einer unterschiedlichen Anzahl von Drehzahl-/Lastpunkten, die getrennt gemessen werden. Die Messung erfolgt entweder für jeden Lastpunkt getrennt mit anschließender rechnerischer Gewichtung oder als eine Messung während der gesamten Tests mit Gewichtung durch den zeitlichen Ablauf. Die Auswahl der Drehzahl-/Lastpunkte und deren Gewichtung stellt das Lastprofil eines Motors nach, wie er in einer jeweiligen Anwendung vorkommt. Als Beispiel sei erwähnt, dass z. B. die Punkte eines Schiffsantriebes der Propellerdrehzahl/-last entsprechen, die durch einen Schiffspropeller vorliegen. Außerdem können auch große Stromgeneratormotoren als Beispiel genannt werden, die nur im Leerlauf und bei einer einzigen Drehzahl vermessen werden, da solche Motoren immer nur bei einer Drehzahl laufen, die der Frequenz des Stromnetzes (50 oder 60 Hz) entspricht.

Als ein weiterer Testzyklus kommt der NRTC Zyklus (Non Road Transient Cycle) gemäß GTR-11 zum Einsatz. Dieser umfasst zwei Phasen zu je 1238 Sekunden mit 20 Minuten Pause zwischen den Phasen. Er stellt jedoch keine realistische Anwendung des Motors dar, sondern enthält Phasen von vielen unterschiedlichen Anwendungen, wie z. B. Traktor, Gabelstapler etc.

Zur Umrechnung des als Prozentzahl von einem Bezugswert definierten Solldrehzahl- und des Solldrehmomentverlaufs wird die jeweils aktuelle Volllastkurve des Motors herangezogen. Mit Hilfe der verschiedenen Kenngrößen dieser Volllastkurve lässt sich das normierte Fahrprofil in einen Drehzahl-/Drehmomentverlauf umrechnen.

### **Prüfablauf Zertifizierungstest**

Der Prüfablauf ähnelt grundsätzlich sehr dem Ablauf, wie er im vorangegangenen Kapitel für Nutzfahrzeugmotoren dargestellt wurde. Je nach abzufahrendem Fahrzyklus kann gegebenenfalls der Kaltstart wegfallen und der Fahrzyklus mit aufgewärmtem Motor gestartet werden.

Mess- und Prüfstandstechnik

Antriebsstrangentwicklung · Hybridisierung ·  
Elektrifizierung

Paulweber, M.; Lebert, K.

2014, XVII, 417 S. 296 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-658-04452-7