

2 Stand der Technik

Die steigende Beliebtheit der Dieselmotortechnik in den vergangenen Jahrzehnten führte zu einer anhaltenden Weiterentwicklung des selbstzündenden Aggregats. Bedingt durch die Problematik der inhomogenen, diffusiven Dieselverbrennung ist die Optimierung des Brennverfahrens durch den Zielkonflikt der gleichzeitigen Verbrauchs- und Emissionsminderung gekennzeichnet. Vor dem Hintergrund der immer strengeren gesetzlichen Limitierung der Schadstoffe und des Flottenverbrauchs werden Systeme zur Reduktion beider Größen benötigt.

2.1 Das konventionelle dieselmotorische Brennverfahren

Beim konventionellen dieselmotorischen Brennverfahren erfolgt die Einspritzung des Kraftstoffs kurz vor dem oberen Totpunkt direkt in die bereits verdichtete Luft des Brennraums. Durch die Wärmeübertragung von der Luft an den Kraftstoff wird das Gemisch entzündet. Die konventionelle Dieselverbrennung teilt sich in die Premixed-Verbrennung, in die mischungskontrollierte und die reaktionskinetischkontrollierte Phase auf [88]. Während der Vormischverbrennung erfolgt eine zügige Umsetzung des Kraftstoffs nach Ablauf des Zündverzugs. Die Umsatzgeschwindigkeit wird dabei hauptsächlich durch die Reaktionsgeschwindigkeit bestimmt, da die stattfindenden Reaktionen rein kinetisch kontrolliert ablaufen. Generell ist bei Brennbeginn der Einspritzvorgang noch nicht abgeschlossen. In diesem Fall vermischt sich der Kraftstoff zunächst mit der Zylinderfüllung. Die Vermischungsgeschwindigkeit wird durch die kinetische, turbulente Energie im Brennraum beeinflusst und bestimmt die zeitliche Umsetzung des Kraftstoffs. Eine diffusive Dieselverbrennung ist die Folge. Nach Einspritzende fällt die Brennrate aufgrund der reduzierten Vermischungsgeschwindigkeit ab. Die Abnahme des Frischluftanteils im Brennraum verursacht eine weitere Verlangsamung des Vermischungsprozesses. Während der fortschreitenden Brennraumexpansion führt die abfallende Brennraumtemperatur zu einer Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit. Die Brennrate wird über einen ausgedehnten Kurbelwinkelbereich reduziert und formt den diffusiven Ausbrand [66].

Das konventionelle Dieselmotorenverfahren ist von dem Zielkonflikt der Stickoxid- und Rußemissionsbildung gekennzeichnet. Innermotorische Maßnahmen wie die Rückführung von verbranntem Abgas oder eine Veränderung des Ein-

spritzprofilen führen grundsätzlich zur Senkung einer der beiden Schadstoffkomponenten bei gleichzeitiger Erhöhung der anderen [64]. Die Umsetzung einer homogenisierten Verbrennung für den dieselmotorischen Antrieb ermöglicht eine gleichzeitige Reduktion der Ruß- und Stickoxidemissionen.

In zahlreichen Veröffentlichungen wird das Potential des alternativen Brennverfahrens zur Emissionsreduktion und Wirkungsgradoptimierung untersucht [23, 40, 60, 84]. Die Umsetzung einer homogenisierten Dieselverbrennung im Fahrzeug ist aufgrund der hohen Anforderungen an das Motorregelungssystem sehr anspruchsvoll. Ein ausgeprägtes Systemverständnis der physikalischen Vorgänge ist für den Funktionsrahmenentwicklungsprozess von fundamentaler Bedeutung.

2.2 Die Homogenisierung der dieselmotorischen Verbrennung

Zur Umsetzung der homogenisierten Dieselverbrennung existieren grundsätzlich die externe und interne Methode zur Gemischaufbereitung. Im externen Fall wird der Kraftstoff durch ein spezielles Einspritzsystem, den Atomizer, in den Einlasskrümmer eingebracht [37]. Abhängig von den luftpfadseitigen Randbedingungen erfolgt die Verbrennung zeitgleich im gesamten Brennraum. Die Homogenisierung des Kraftstoff-Luftgemischs in Verbindung mit hohen Abgasrückführaten ermöglicht die gleichzeitige Reduktion der Stickoxid- und Rußemissionen des Dieselmotors in einem eingeschränkten Last- und Drehzahlbereich. Die Trennung von Gemischbildung und Verbrennung beim vollhomogenen Brennverfahren erschwert jedoch dessen Regelung. Speziell während transienter Motorbetriebsbedingungen führt die Trägheit des Luftpfads zu ungewünschten Zuständen im Brennraum. Aufgrund der ausgeprägten Sensitivität des Brennverfahrens auf luftpfadseitige Änderungen der Randbedingungen ergeben sich unter Umständen durch eine sehr schnelle Verbrennung erhöhte Geräuschemissionen. Bei einer inneren Gemischbildung hingegen, erfolgt die Kraftstoffeinspritzung direkt in den Brennraum. Hohe Abgasrückführaten und eine frühe Einspritzung des Kraftstoffs ermöglichen ebenfalls eine im Vergleich zur diffusiven Dieselverbrennung verbesserte Homogenisierung. Untersuchungen aus [77] zeigen, dass der Einspritzbeginn für das vorgestellte Motorkonzept auf 30 °KW vor dem oberen Totpunkt begrenzt werden sollte. Bei früheren Spritzbeginnen ist durch die verstärkte Homogenisierung keine Beeinflussung der Verbrennungslage durch den Einspritzbeginn mehr möglich. Im Vergleich zum vollhomogenen Brennverfahren besitzt eine teilhomogene Verbrennung neben dem geringeren Hardwareaufwand den Vorteil der zusätzli-

chen Regelbarkeit durch den Kraftstoffpfad und wird daher im Rahmen dieser Arbeit als Brennverfahren eingesetzt. Aus thermodynamischen Gründen begrenzt sich die Anwendbarkeit der teilhomogenen Verbrennung auf einen eingeschränkten Kennfeldbereich. In Abbildung 2.1 sind die vorhandenen Last- und Drehzahlgrenzen der teilhomogenen Verbrennung dargestellt.

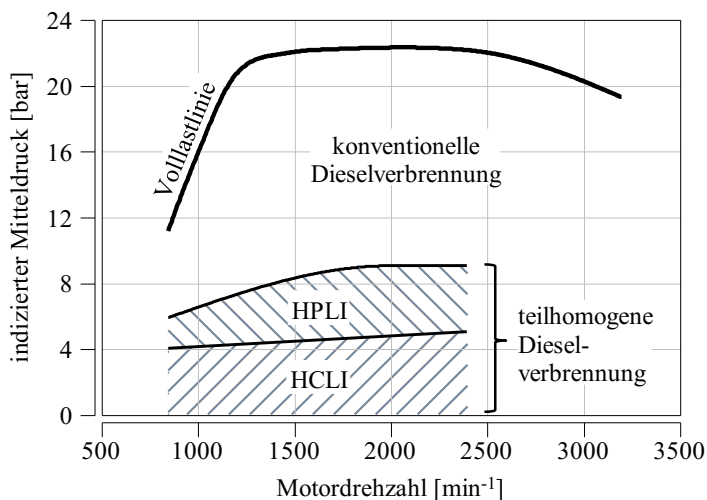


Abbildung 2.1: Kennfeldbereich der teilhomogenen Verbrennung [3]

Zur Umsetzung des alternativen Brennverfahrens erfolgt die Kraftstoffeinspritzung durch eine einzelne Blockeinspritzung. Der Beginn der Wärmefreisetzung wird über ein Tangentenverfahren anhand der Hochtemperaturverbrennung bestimmt.

In [3, 77] wird die teilhomogene Verbrennung in das Homogeneous Charge Late Injection (HCLI) und Highly Premixed Late Injection (HPLI) Brennverfahren unterteilt. Das HCLI-Brennverfahren ist ausschließlich bei unterer Teillast umsetzbar. Zur Optimierung des inneren Wirkungsgrads und zur Reduzierung der Schadstoffemissionen ist nach [76] ein Brennbeginn im oberen Totpunkt anzustreben. Die Menge an rückgeführtem Abgas steuert die Umsatzrate des Kraftstoffs und bestimmt die Größenordnung der maximalen Brennraumdruckgradienten und der resultierenden Geräuschemissionen. Die mit steigender Drehzahl abnehmende Zeit für die Gemischhomogenisierung begrenzt das Brennverfahren in der darstellbaren Motordrehzahl. Ab 2400 U/min ist aufgrund von Verbrennungsinstabilitäten eine Umschaltung zum konventionel-

len Dieselmotoren notwendig. Eine Erhöhung der Last bei konstanten Brennraumdruckgradienten ist aufgrund der Lambdagrenze limitiert. Für einen Grenzwert von $6 \text{ bar/}^\circ\text{KW}$ des Brennraumdruckgradienten und einer minimal zulässigen Abgaszusammensetzung λ von 1,2 ergibt sich die in Abbildung 2.1 dargestellte HCLI-Grenze. Um eine weitere Erhöhung der Last unter Berücksichtigung der physikalischen Grenzwerte zu ermöglichen, wird die Menge an rückgeführtem Abgas reduziert, der Ladedruck erhöht und die Verbrennung zur Reduktion des Motorengeräuschs in die Expansionsphase verschoben. Das HPLI-Brennverfahren ist aufgrund der schlechteren Gemischaufbereitung durch höhere Ruß-, CO- und HC-Emissionen gekennzeichnet [76]. Aus Gründen der Verbrennungsstabilität ist das HPLI-Brennverfahren in der darstellbaren Last und Drehzahl begrenzt.

Zur Identifikation wichtiger luftpfad- und einspritzseitiger Einflussparameter des teilhomogenen Brennverfahrens ist eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse für die Reglerentwicklung notwendig. Die im Folgenden dargelegten Ergebnisse fassen die Erkenntnisse der Arbeiten [3] und [76] zusammen. Eine ausführlichere Analyse ist den einzelnen Veröffentlichungen zu entnehmen. Luftpfadseitig weisen die Messergebnisse einen signifikanten Einfluss des Ladedrucks, der Ansaugtemperatur und des Sauerstoffgehalts im Saugrohr auf die teilhomogene Verbrennung nach. Einspritzseitig wird ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen dem Spritzbeginn, der Verbrennungslage und der zeitlichen Wärmefreisetzung aufgezeigt. Über die Regelung des Raildrucks und der Ansteuerdauer der Blockeinspritzung wird eine Veränderung des indizierten Mitteldrucks ermöglicht. Die Erkenntnisse bilden die Grundlage für den späteren Regelstrukturentwicklungsprozess der teilhomogenen Dieselmotoren.

2.2.1 Der Ladedruckeinfluss auf die teilhomogene Verbrennung

Die Analyse der Sensitivität des teilhomogenen Brennverfahrens auf Veränderungen im Zylinderdruck bei Einspritzbeginn erfolgt über eine Variation des Saugrohrdrucks. In Abbildung 2.2 ist der Einfluss des Ladedrucks auf die zeitliche Wärmefreisetzung dargestellt. Der Brennverlauf beschreibt die Umwandlung von chemisch gebundener Energie im Kraftstoff zu Wärmeenergie. Über die Veränderung der Turbinenleitschaufelposition wird eine Variation des Ansaugdrucks ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen den deutlichen Zusammenhang zwischen dem Ladedruck und dem Zündverzug der Hochtemperaturverbrennung. Als Zündverzug wird die Phase zwischen Einspritzbeginn und Brennbeginn definiert. Dieser Effekt wird auf die mit steigender Zylinderfüllung verbundene Erhöhung der absoluten Anzahl an Sauerstoffmolekülen zurückgeführt. Über die Dauer des Zündverzugs wird der Grad an Homogenisierung

des Gemischs bestimmt. Die mit steigendem Zündverzug verbesserte Homogenisierung des Kraftstoffdampfs mit der Zylinderladung führt zu einer verstärkten Ausmagerung der Gemischwolke und verursacht eine Vergrößerung der Brenndauer. Daher sinkt bei niedrigerem Saugrohrdruck das Brennverlaufsmaximum, während die Brenndauer vergrößert wird.

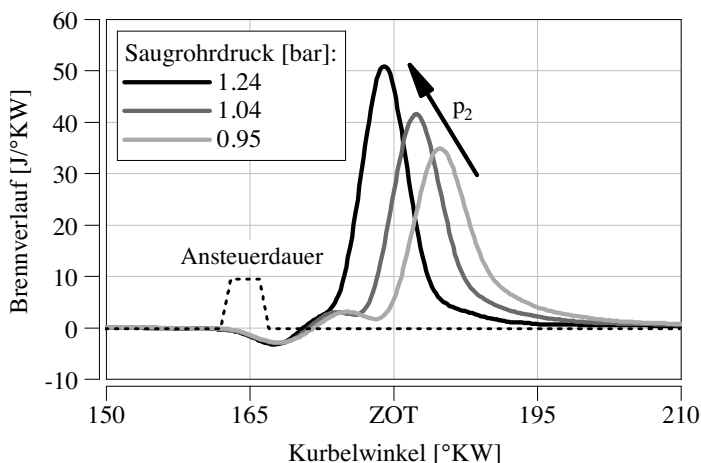


Abbildung 2.2: Sensitivität der teilhomogenen Verbrennung auf Veränderungen im Ladedruck [3]

Weiterführende Messergebnisse in [3] mit konstantem Brennbeginn der Hochtemperaturverbrennung verdeutlichen den getrennten Effekt des Ladedrucks auf den Zündverzug und auf die maximalen Brennraumdruckgradienten. Um bei einer Erhöhung des Ladedrucks den emissions- und wirkungsgradoptimalen Brennbeginn im oberen Totpunkt zu gewährleisten, ist ein späterer Einspritzzeitpunkt notwendig. Der kürzere Zündverzug und die damit verbundene Beeinflussung der Gemischaufbereitungsphase führt zu einer Erhöhung der Druckgradienten trotz identischer Verbrennungslage. Der Saugrohrdruck ist folglich eine wichtige Führungsgröße für das Regelungssystem der teilhomogenen Verbrennung.

2.2.2 Der Einfluss des Sauerstoffgehalts auf die teilhomogene Verbrennung

Neben dem Saugrohrdruck stellt die Zusammensetzung des angesaugten Abgas-Frischlufte-Gemischs eine wichtige Einflussgröße des teilhomogenen Verbrennungsablaufs dar. Bereits in [76, 86] wird daher der Sauerstoffgehalt im

Saugrohr als Führungsgröße für die teilhomogene Verbrennung festgelegt. In Abbildung 2.3 sind die Messergebnisse für eine Variation des Sauerstoffgehalts im Saugrohr aus [3] dargestellt.

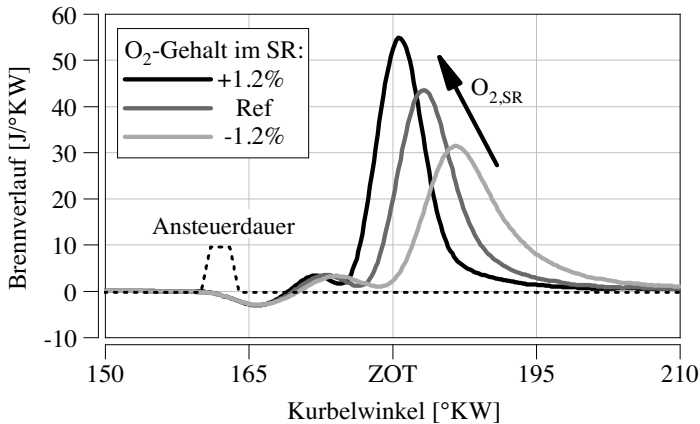


Abbildung 2.3: Sensitivität der teilhomogenen Verbrennung auf Veränderungen im Sauerstoffgehalt des Einlasskrümmers [3]

Der Sauerstoffgehalt im Einlasskrümmer wird vollständig durch die niederdruckseitige Abgasrückführung eingestellt. Ladedruck und Ansaugtemperatur sind konstant. Die mit steigender AGR-Rate reduzierte Anzahl an möglichen Reaktionspartnern für den Kraftstoff verursacht eine Erhöhung des Zündverzugs und der Brenndauer. Das Brennverlaufsmaximum und die maximalen Brennraumdruckgradienten werden dabei reduziert. Neben der Beeinflussung des Brennverlaufs führt eine Reduktion des Sauerstoffgehalts im Saugrohr zu einer erhöhten Inertgasmasse mit vergleichsweise hoher Wärmekapazität. Die thermisch bedingte Stickoxidbildung nimmt durch die niedrigen Brennraumspitzentemperaturen im Verbrannten ab. Bei höheren Abgasrückführaten führt die reduzierte Brennraumtemperatur durch die Inertgasmasse zu einer erhöhten HC- und CO-Bildung. Weiterführende Analysen in [3] bestätigen den Effekt des Sauerstoffgehalts im Einlasskrümmer auf den Verbrennungsablauf. Bei einem konstanten Brennbeginn im Bereich des oberen Totpunkts führt eine Reduktion der AGR-Rate zu steigenden maximalen Brennraumdruckgradienten. Die Zusammensetzung des Gemischs aus Abgas und Frischluft beeinflusst sowohl die Verbrennungslage als auch die Gemischbildungsphase, woraus eine entsprechende Veränderung der zeitlichen Wärmefreisetzung resultiert. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse ist neben dem Ladedruck der Sauerstoffgehalt

im Saugrohr eine relevante Führungsgröße für das Luftpfadregelungssystem. Regelfehler führen unter Umständen aufgrund der ausgeprägten Sensitivität zu einem schlechteren Wirkungsgrad und zu einer Erhöhung der anfallenden Abgas- und Geräuschemissionen.

2.2.3 Der Einfluss der Ansaugtemperatur auf die teilhomogene Verbrennung

In [3] wird der Temperatureinfluss der Frischladung im Saugrohr auf die teilhomogene Verbrennung untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Der Ladedruck und der Sauerstoffgehalt im Einlasskrümmer werden nicht verändert. Über die Variation der Konditioniertemperatur des Ladeluftkühlers wird der Einfluss der Starttemperatur auf die teilhomogene Verbrennung untersucht. Die Erhöhung der Temperatur führt zu einer umgekehrt proportionalen Veränderung der Zylinderfüllung. Einerseits wird die absolute Anzahl an Reaktionspartnern der Kraftstoffmoleküle durch eine Starttemperaturerhöhung reduziert, andererseits überwiegt der Temperatureinfluss auf die Radikalbildung, sodass die Zündverzugsphase mit steigender Starttemperatur reduziert wird. Im Betrieb gelingt eine bewusste Variation der Ansaugtemperatur über eine Veränderung der stationären HD- und ND-AGR-Aufteilung. Der Ausgleich einer Veränderung der Umgebungstemperatur erfolgt über die Aufteilung der rückgeführten Abgasmenen.

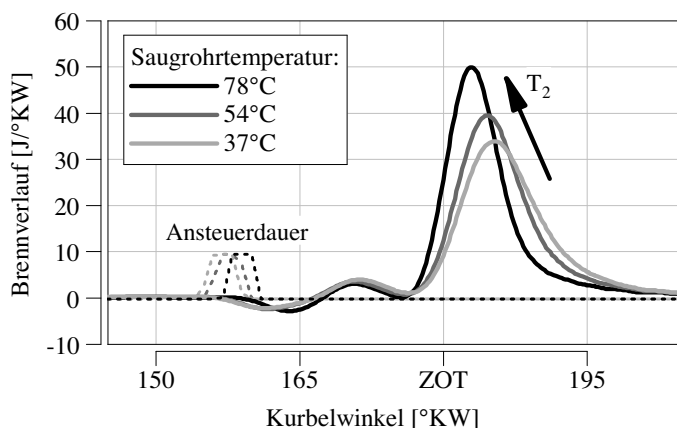


Abbildung 2.4: Sensitivität der teilhomogenen Verbrennung auf Veränderungen der Ansaugtemperatur [3]

2.2.4 Der Einfluss des Einspritzpfads auf die teilhomogene Verbrennung

Die Wärmefreisetzungsrate bei der dieselmotorischen Verbrennung wird wesentlich durch das Einspritzprofil des Injektors bestimmt [66]. Über das Einspritzmuster wird die Anzahl der Einspritzungen festgelegt. Das Zusammenlegen der Vor- und Haupteinspritzung zu einer einzigen Blockeinspritzung führt zu einer Vergrößerung des Zündverzugs [3]. Das hat eine verbesserte Homogenisierung des Kraftstoff-Luft-Gemischs zur Folge. Die eingespritzte Kraftstoffmasse definiert die maximal umsetzbare Energiemenge und wird durch die Ansteuerdauer und den Raildruck festgelegt. Untersuchungen in [76, 86] zeigen eine deutliche Verbesserung der Homogenisierung bei einer Blockeinspritzung durch eine Raildruckerhöhung. Aus diesem Grund wird für die teilhomogene Verbrennung ein, im Vergleich zum konventionellen Dieselmotorenverfahren, erhöhter Raildruck vorgegeben. Über die Veränderung der Ansteuerdauer der Blockeinspritzung erfolgt die Steuerung der eingespritzten Masse. In [86] wird daher die Ansteuerdauer als Führungsgröße der Lastregelung definiert. Neben dem Raildruck und der Ansteuerdauer wird der Verbrennungsablauf wesentlich vom Einspritzbeginn bestimmt. Die Messergebnisse zur Sensitivitätsanalyse des Einspritzbeginns aus [3] sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Wird der Ansteuerbeginn ausgehend von einem Referenzpunkt verschoben, verändert sich der Brennverlauf deutlich. Aufgrund der längeren Zündverzugsphase nähert sich die Verbrennung bei einem sehr frühen Einspritzbeginn der einer vollhomogenen Wärmefreisetzungsrate an.

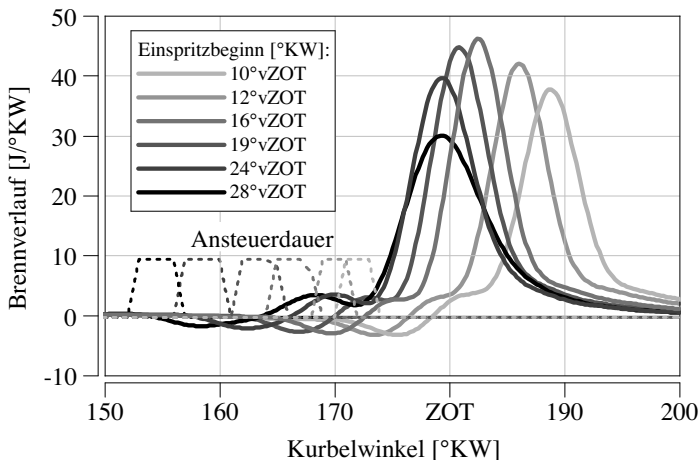


Abbildung 2.5: Sensitivität der teilhomogenen Verbrennung auf Veränderungen des Einspritzzeitpunkts [3]

Ein Brennbeginn am oberen Totpunkt verursacht eine vergleichsweise schnelle Wärmefreisetzung und führt zu erhöhten Brennraumdruckgradienten. Wird der Brennbeginn in die Expansionsphase verschoben, reduzieren sich die maximalen Brennraumdruckgradienten und die Brenndauer steigt an. Eine Verschlechterung des Kraftstoffumsetzungsgrads und eine Erhöhung der HC- und CO-Emissionen resultieren aus der verlängerten Brenndauer. Im Rahmen dieser Arbeit wird der vorgestellte Zusammenhang zwischen maximalem Druckgradienten, Brennbeginn und Einspritzbeginn ausgenutzt, um die Geräuschemissionen während transienten Phasen zu begrenzen.

2.3 Die Luftpfadregelung des Dieselmotors

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der teilhomogenen Verbrennung gegenüber Veränderungen der physikalischen Randbedingungen im Luftpfad. Eine Regelung mit guten Führungseigenschaften ist daher für die Umsetzung des teilhomogenen Brennverfahrens von signifikanter Bedeutung. Zur Regelung des Luftpfads mit konventionellem und alternativem Brennverfahren existieren in der Literatur bereits unterschiedlichste Strukturen.

2.3.1 Die Luftpfadregelung bei konventioneller dieselmotorischer Verbrennung

In der Literatur werden zur Regelung des Luftpfads mit konventionellem Dieselmotoren häufig die Luftmasse und der Ladedruck als Führungsgrößen definiert. Nach [57] unterteilt sich das Basis-Regelungskonzept der Frischluftmasse in drei Bereiche: die Sollwertberechnung, die Vorsteuerung und die Stellwertberechnung. In der Sollwertstruktur wird der Sollwert unter Berücksichtigung der Korrekturfunktionen und der systembedingten Trägheit betriebspunktabhängig dem Regler vorgegeben. Zur Unterstützung des instationären Führungsverhaltens werden die stationär zum Sollwert zugehörigen Stellgliedpositionen mit dem Reglerausgang addiert. Eine Begrenzung des AGR-Regelungsbetriebs wird unter Berücksichtigung einer Hysterese umgesetzt. Die Basisvariante der Ladedruckregelung teilt sich nach [57] in analoger Weise zur Luftmassenregelung in die drei Bereiche auf. Bereits in [55] wird zur Führung der Luftmasse und des Ladedrucks ein modellgestütztes prädiktives Regelungssystem entwickelt, welches die gegenseitige Interaktion beider Systeme berücksichtigt. Da jedoch die Zusammensetzung und Masse der Zylinderladung die vom Motor ausgestoßenen Abgasemissionen direkt beeinflussen, eignen sich Frischluftmasse und Ladedruck nur bedingt als Regelgrößen.

ben. In [57] wird daher eine alternative Sollwertstruktur mit der AGR-Masse und Gesamtfüllung als Regelgrößen vorgeschlagen. Über eine zylinderdruckbasierte Füllungserfassung und ein echtzeitfähiges Modell des Luftpfads wird die AGR-Masse und die Zylinderfüllung ermittelt. Aufgrund der Systemvolumina gleicht bei transienten Motorbetriebsbedingungen der gemessene Frischluftmassenstrom vor Verdichter nicht dem Massenstrom vor der HD-AGR-Beimischung. Über die Berücksichtigung der Druckänderungsrate wird zur Berechnung der AGR-Rate mittels Modell der notwendige Massenstrom errechnet. Als alternatives Verfahren zur Bestimmung der Zylinderfüllung wird in [21] ein künstliches neuronales Netzwerk zur Bestimmung des Liefergrads vorgestellt. Bei geringer Rechenzeit wird ohne Zylinderdruckindizierung eine vergleichbare Genauigkeit erzielt. Die Funktionen der Abgasrückführmassen- und Füllungsregelung aus [57] unterteilen sich in die Bereiche der Regelung, Entkopplung, Vorsteuerung und Koordination. In Abbildung 2.6 ist die P-kanonische Modellstruktur der Regelstrecke schematisch dargestellt. Die gegenseitige Beeinflussung des Turbolader- und AGR-Systems erfordert die Formulierung eines Mehrgrößenregelungssystems.

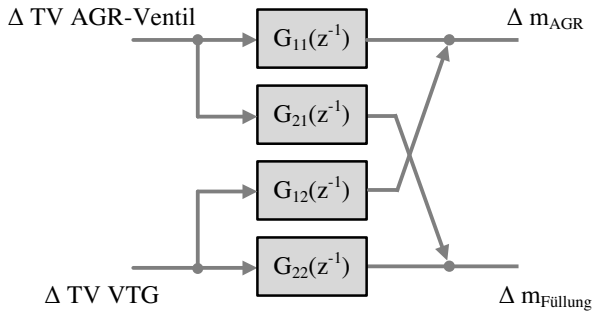


Abbildung 2.6: Modellstruktur Ladedruck- und Luftmassenregelungssystem [57]

Die Beurteilung der Genauigkeit des Füllungsmodells und der Regelgüte erfolgt im NEFZ. Das veränderte Regelkonzept führt im Vergleich zur Basisvariante zu einer gleichzeitigen Reduktion der Stickoxid- und Rußemissionen. In [71] wird ein modellbasiertes Regelungskonzept für Dieselmotoren mit zwei Abgasrückführpfaden und einer ansaugseitigen Drossel vorgestellt. Um das Mehrgrößenregelungssystem durch echtzeitfähige Modelle zu unterstützen, werden virtuelle Sensoren zur Bestimmung notwendiger Drücke, Temperaturen und Massenströme entwickelt und eingesetzt. Als Führungsgrößen werden der Ladedruck und die Frischluftmasse definiert. Ausgehend vom ap-

plizierten Sollwert der Luftmasse wird über ein Füllungsmodell des Motors zunächst der notwendige Gesamt-AGR-Massenstrom bestimmt. Abhängig vom vorgegebenen Anteil der ND-AGR wird der Zielwert des rückgeführten Abgasmassenstroms beider AGR-Pfade ermittelt. Auf Basis des definierten AGR-Massenstroms wird die effektive Strömungsfläche dem PI-Regler vorgegeben. Die Bestimmung des Istwerts der effektiven Strömungsfläche erfolgt über die modellbasierte Überprüfung der vorhandenen rückgeführten Abgasmenge. Die Regelung ermittelt die Ansteuerposition der Aktorik. Die Verwendung der virtuellen Sensoren ermöglicht die Reduktion der einzusetzenden Hardware und führt zu einem deutlich verbesserten Regelverhalten durch die modellbasierte Unterstützung der Funktionsstruktur. Bereits in zahlreichen Veröffentlichungen wird der Sauerstoffgehalt bzw. der Luftmassenanteil des Luft-Abgas-Gemischs im Einlasskrümmer als verbrennungsrelevante Größe charakterisiert [58, 61, 69]. Speziell bei mager betriebenen Dieselmotoren führt eine Abgasrückführung zu einem Zirkulationseffekt der Gaszusammensetzung. Die Verwendung einer zusätzlichen niederdruckseitigen Abgasrückführung verstärkt diesen Effekt. Der Parameter AGR-Rate beschreibt in transienten Motorbetriebsphasen nicht die Randbedingungen der Verbrennung. Die Luftmasse wird daher in der Literatur durch die Gaszusammensetzung als Führungsgröße ersetzt. In [58] wird ein virtueller Sensor zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr für einen Dieselmotor mit hochdruckseitiger Abgasrückführung vorgestellt. Über die Verknüpfung der AGR-Rate mit der Abgaszusammensetzung wird der Sauerstoffgehalt im Saugrohr bestimmt.

In [15] wird ein semi-physikalischer Ansatz zur echtzeitfähigen Bestimmung der AGR-Rate und des Sauerstoffgehalts im Einlasskrümmer hergeleitet. Eine Zuordnung der Fehlzündungen während transienten Betriebsphasen zum Modellwert ermöglicht eine bessere Interpretation der Messergebnisse. Im Gegensatz zu physikalisch basierten Ansätzen zur Bestimmung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr, wird in [61] eine mathematische Methode verwendet. Im Rahmen der Untersuchungen werden die Ergebnisse eines künstlichen neuronalen Netzwerks und die eines Neuro-Fuzzy-Inferenzsystems zur Bestimmung des volumenbezogenen Sauerstoffgehalts bei Betriebspunkten mit HD-AGR verglichen. Beide Modelle erreichen für die Validierungsdaten eine absolute Abweichung von maximal 0,9 % im Sauerstoffgehalt. Das Transportverhalten des Sauerstoffgehalts zwischen dem Auslass- und Einlassventil eines Dieselmotors mit zwei Abgasrückführstrecken ist wesentlich vom Motorbetriebspunkt abhängig. Die Berücksichtigung der systembedingten Unterschiede beider AGR-Strecken im Luftpfadregelungssystem sind von signifikanter Bedeutung. In [101] wird ein physikalischer Ansatz zur Beschreibung der Transportvorgänge dargelegt und anhand von Simulationsergebnissen eines Strömungs-

modells validiert. Auf der Grundlage der mittels „Mean Value Model“ errechneten Systemmassenströme wird, abhängig vom Finiten Volumen, die Totzeit bestimmt. In [11] wird ein virtueller Sensor zur Bestimmung der Sauerstoffkonzentration im Einlasskrümmer vorgestellt. Die Validierung des Modells erfolgt anhand von instationären Messdaten eines Dieselmotors mit hochdruckseitiger Abgasrückführung. Ausgehend von der eingespritzten Kraftstoffmasse oder von der gemessenen Abgaszusammensetzung λ , wird unter Berücksichtigung der Streckenlaufzeit der Sauerstoffgehalt im Einlasskrümmer errechnet. Die Luftmassenregelung wird durch eine kaskadierte Regelung des Sauerstoffgehalts im Saugrohr ersetzt. Die innere Schleife der Kaskadenstruktur beschreibt die Regelung der AGR-Rate. Die äußere Schleife bestimmt den Sollwert für die Abgasrückführrate. Beide Kreise unterscheiden sich in ihrer Regelgeschwindigkeit. Aufgrund des Zirkulationseffekts des Sauerstoffgehalts ist eine Veränderung der AGR-Rate deutlich direkter möglich und wird folglich als Führungsgröße der inneren Schleife definiert. Einen unterschiedlichen Ansatz zur Regelung des Luftpfads und der Verbrennung verfolgt die ETH Zürich im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte. In [83] wird ein Mehrgrößenregelungssystem der Stickoxid- und Rußemissionen zur Beeinflussung des Trade-Offs beschrieben. Als Führungsgrößen werden die Abgaszusammensetzung λ und die Stickoxidemissionen definiert. Echtzeitfähige Modelle für die Regelgrößen werden im NEFZ validiert und unterstützen die Regelstruktur. Im Vergleich zur konventionellen AGR-Regelung ermöglicht die Verwendung des Mehrgrößenregelungssystems den Ausgleich von Fehlern im Luft- und Kraftstoffpfad. Über eine Optimierung der Sollwerte für den Emissionsregler wird eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch eine gezielte Beeinflussung des NOx-Ruß-Trade-Offs erreicht.

In [92] wird die in [83] eingeführte Führungsgröße λ durch einen virtuellen Rußsensor ersetzt, wodurch eine direkte Regelung der angefallenen Stickoxid- und Rußemissionen ermöglicht wird. Neben der AGR-Ventilposition zur Regelung der Stickoxidemissionen wird die Position der Drallklappen des Dieselmotors als Stellgröße des Rußregelkreises definiert. Die Funktionsweise des Regelungssystems wird durch Untersuchungen im NEFZ und im FTP-72 bestätigt. Die Emissionsregelung benötigt keine Vorgabe von Sollkennfeldern für die Luftpfadgrößen. Der vorgestellte modellbasierte Ansatz ermöglicht die direkte Regelung der vorgegebenen Emissionssollwerte. Eine weitere Verbesserung der Regelstrategie durch die Einführung einer optimierten feedbackbasierten Emissionsregelung wird in [22] ausgeführt. Durch eine universelle Kalibrierung des Steuergeräts wird eine Online-Umstellung der Emissionsstrategie des betriebswarmen Motors jederzeit ermöglicht. Der Ansatz aus [93] zur virtuellen Bestimmung der Emissionen wird durch weiterfüh-

rende Prüfstandsuntersuchungen verbessert. Die Untersuchungen des Motorbetriebsverhaltens mit optimierter Emissionsregelung erfolgt anhand der Fahrprofile NEFZ und WLTC. Ein emissionsbasiertes und ladungswechseloptimiertes Luftpfadregelungssystem für das dieselmotorische Brennverfahren wird in [48, 49, 85, 95] für eine Real-Driving-Emission-Anwendung vorgestellt. In [48] wird zunächst die Sensitivität der Ruß- und Stickoxidbildung auf Luftpfadgrößen untersucht und durch einen empirischen Modellansatz erfasst. Zur Regelung der AGR-Rate und der Turbinenleitschaufelposition wird ein Mehrgrößenregelungssystem mit dem Ladedruck bzw. Abgasgegendruck und den Stickoxidemissionen als Führungsgrößen definiert. Ein alternativer Regelkreis der Turbinenleitschaufelposition ermöglicht das Führen der Gemischzusammensetzung λ . Speziell in transienten Phasen wird durch die Verwendung des Emissionsmodells zur Bestimmung der Sollwerte für die Luftpfadregelung eine signifikante Reduktion der Stickoxid- und Rußemissionen erreicht. In [85] wird ein Verfahren zur modellbasierten Bestimmung des Soll-ladedrucks unter Optimierung des Gesamtwirkungsgrads konkretisiert, welches in [48] zur Aufteilung der AGR-Raten eines mehrpfadigen Abgasrückführsystems verwendet wird. Die Berechnung des Anteils an niederdruckseitiger Abgasrückführmenge erfolgt über ein Verdichtermodell unter Optimierung des Verdichtereffizienzwirkungsgrads. Der zur Regelung der AGR-Pfade notwendige Sollwert des Sauerstoffgehalts im Einlasskrümmer wird über ein invertiertes NOx-Modell errechnet. Die Regelung der Temperatur im Einlasskrümmer erfolgt durch ein invertiertes Zündverzugsmodell. Abhängig von der Temperaturanforderung werden die AGR-Bypass-Klappenposition, die AGR-Ventilposition, die Steuerzeiten und die Aufteilung der HD- zur ND-AGR-Rate geregelt. Das System ermöglicht die Kompensation der Umgebungstemperaturbeeinflussung auf die Verbrennung und die Emissionsbildung. Einen anderen Weg zur Regelung von Dieselmotoren verfolgt das Institut für Automatisierungstechnik und Mechanik der Universität Darmstadt.

In [52] wird ein Verfahren zur optimierten Vermessung von Verbrennungsmotoren und Reduktion des Modellierungsaufwands vorgestellt. Die Modelle zur Simulation des Luft- und Kraftstoffpfads basieren auf künstlichen neuronalen Netzen [46, 82]. Ein Wechsel- und Parallelbetrieb der Online-Vermessung und Online-Auswertung ermöglicht eine Reduktion des Messaufwands. Aus der Kombination des dynamischen Luftpfadmodells und eines stationären Verbrennungsmodells erfolgt die Berechnung des Motormoments. In [53] wird die aus [52] dargelegte Methodik zur automatisierten Online-Bestimmung um aktiv lernende Methoden erweitert. Basierend auf dem aktuellen Prozesswissen werden über einen geeigneten Rechenalgorithmus der Messplan und das Modell zielgerichtet adaptiert.

2.3.2 Die Luftpfadregelung bei teilhomogener Verbrennung

Unter der Vielzahl an bereits veröffentlichten Luftpfadregelungssystemen beziehen sich [20, 77, 86] auf die Regelung der teilhomogenen Verbrennung. Diese sind daher für die vorliegende Arbeit von größerer Bedeutung. In [20] wird ein modellbasiertes Mehrgrößenregelungskonzept für einen Dieselmotor mit Niedertemperaturverbrennung vorgestellt. Für den Luftpfad wird ein modellbasiertes prädiktives Regelungssystem eingesetzt. Über die sukzessive Linearisierung eines nichtlinearen Luftpfadmodells wird ein verbessertes Reglerverhalten in transienten Motorbetriebsphasen ermöglicht. Luft- und Kraftstoffpfadregelung werden in kaskadierter Form verknüpft. Das Führungsverhalten des Luftpfads wird durch den inneren Regelkreis beschrieben. Ladedruck und Abgasrückführ率 stellen die Regelgrößen dar. Das Führen des indizierten Mitteldrucks, der Schwerpunktlage und des maximalen Druckgradienten erfolgt im äußeren Regelkreis. Die Verknüpfung von Luftpfad- und Verbrennungsregelung ermöglicht die direkte Vorgabe von verbrennungsrelevanten Sollwertgrößen. Als Stellgröße für die Regelung des indizierten Mitteldrucks wird die eingespritzte Kraftstoffmasse ausgewählt. Die Schwerpunktlage wird durch den Einspritzwinkel eingestellt. Abhängig vom definierten Brennraumdruckgradienten wird über das Kaskadenregelungssystem der Sollwert der AGR-Rate dem Luftpfadfunktionsrahmen übergeben. Eine zusätzliche Definition der Soll-AGR-Rate entfällt durch die Regelung.

In [77, 86] wird auf Basis einer umfangreichen Sensitivitätsstudie der teilhomogenen Verbrennung aus [76] ein Funktionsrahmen der Regelung des Luft- und Kraftstoffpfads mit alternativem Brennverfahren hergeleitet. Zur Erhöhung der rückführbaren Abgasmenge wird eine modifizierte hochdruckseitige Abgasrückführung umgesetzt. Die Entnahme des Abgases erfolgt im Auslasskrümmer. Aufgrund der verbesserten Kühleigenschaften wird die Zumischung vor dem Ladeluftkühler positioniert. Die Regelung des Luftpfads beschränkt sich auf das Ventil der modifizierten HD-AGR-Strecke und nutzt den mittels der Lambdasonde im Saugrohr bestimmten Sauerstoffgehalt als Regelgröße. Zur Optimierung des Führungsverhaltens im instationären Motorbetrieb wird zum Reglerausgang ein kennfeldbasierter Vorsteuerwert addiert. Ausgeprägte Sollwertabweichungen der Luftpfadregelung und der maximalen Brennraumdruckgradienten entstehen durch die systembedingte Trägheit des Sauerstoffregelkreises im instationären Motorbetrieb. Abhängig von der Last und Drehzahl wird die Stellung der Turbinenleitschaufelposition durch ein Kennfeld vorgegeben. Die zylinderindividuelle Regelung des indizierten Mitteldrucks erfolgt über die Ansteuerdauer der Haupteinspritzung. Der in [86] eingeführte inverse Regler ermöglicht das Führen der Brennraumdruckgradienten unter Vermei-

dung eines Brennbeginns in der Kompressionsphase. Die Regelungssysteme der Last, des Raildrucks und der Brennraumdruckgradienten werden durch kennfeldbasierte Vorsteuerungen unterstützt. Über die Verknüpfung der gemessenen Sollwertabweichung des Sauerstoffgehalts im Einlasskrümmer und des Einspritzzeitpunkts wird die Begrenzung der maximalen Druckgradienten während instationärer Betriebsphasen ermöglicht. Zur Darstellung des städtischen Bereichs des Neuen Europäischen Fahrzyklus wird ein Funktionsrahmen zur gesteuerten Betriebsartenumschaltung zwischen dem alternativen und konventionellen Betriebsmodus vorgestellt. Die Betriebsarten des Luft- und des Kraftstoffpfads sind getrennt veränderbar. Zunächst erfolgt die sprunghafte Umschaltung des AGR-Ventils und der VTG-Position auf den Zielwert. Aufgrund des steigenden Sauerstoffgehalts im Einlasskrümmer wird der Einspritzzeitpunkt in die Expansionsphase verschoben. Erreicht der Sauerstoffgehalt im Saugrohr einen definierten Wert, wird das Einspritzmuster von einer Block- auf eine Mehrfacheinspritzung umgeschaltet. Im Anschluss erfolgt die Anpassung des Raildrucks unter Kompensation der Ansteuerdauer.

Die Ergebnisse aus [86] zeigen ein gutes Führungsverhalten der Regelgrößen im städtischen Teil des NEFZ. Aufgrund der Kondensationseffekte im Ladeluftkühler ist jedoch das modifizierte hochdruckseitige Abgasrückführsystem nicht für einen dauerhaften Einsatz geeignet. Darüber hinaus wird in [77, 86] ein ausgeprägter Alterungseffekt der Lambdasonde im Saugrohr durch AGR-Verschmutzung nachgewiesen. Ein Regelkreis auf Basis des Sensorwerts ist daher für eine zukünftige Serienanwendung nicht akzeptabel.

2.4 Die simulationsgestützten Funktionsentwicklungsmethoden

Zur Unterstützung des Funktionsentwicklungsprozesses und der Motorregelung werden echtzeitfähige Modelle in vielfältiger Weise verwendet [54, 62, 65, 67, 97]. In [75] wird ein schnellrechnendes Mean-Value-Model (MVM) eines Dieselmotors mit niederdruckseitiger Abgasrückführung vorgestellt. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, werden 11 Zustände und 5 Finite Volumina zur Simulation des Luftpfads definiert. Die Berechnung der Änderungsrate der Systemdrücke erfolgt über die thermische Zustandsgleichung in differentieller Form:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R \cdot T}{V} (\dot{m}_{Ein} - \dot{m}_{Aus}) \quad (2.1)$$

Zur Berechnung der Druckänderungsrate werden das Volumen und die Temperatur als zeitlich konstant angenommen. Das Druckgefälle zweier benachbarter

Systeme und die Drossелеigenschaften der Verbindung bestimmen den ausgetauschten Massenstrom. Der effektive Strömungsquerschnitt A_{eff} errechnet die Größenordnung des Massenstroms nach Gleichung 2.2 [41]:

$$\dot{m} = \frac{4 \cdot p_1}{\sqrt{R \cdot T_1}} \cdot A_{\text{eff}} \quad (2.2)$$

Abhängig vom anliegenden Druckgefälle gilt für den effektiven Strömungsquerschnitt A_{eff} Gleichung 2.3 unter der Bedingung 2.4.

$$A_{\text{eff}} = \xi \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \right]} \quad (2.3)$$

$$\frac{p_2}{p_1} > \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (2.4)$$

Das Mean-Value-Model des Dieselmotors ermöglicht die Simulation relevanter Luftpfadgrößen in stationären und transienten Betriebsphasen. Die Modellierung der Verbrennung erfolgt entweder durch eine Arbeitsprozessrechnung [8, 79] oder über einen mathematischen Ansatz [70]. Aufgrund des geringen Rechenaufwands ist die Verwendung eines MVM im Rahmen der Funktionsentwicklung möglich und kommt daher bereits in Model-, Software- und Hardware-in-the-Loop Umgebungen (MiL, SiL, HiL) zur Anwendung. Die unterschiedlichen Simulationsstufen unterscheiden sich wesentlich in ihrem Echtzeitverhalten. Nach [9] wird zwischen einer echtzeitfähigen und einer nicht echtzeitfähigen Umsetzung unterschieden. Während die MiL-Simulation nicht zwangsweise in Echtzeit abläuft, ist bei einer HiL-Umgebung harte Echtzeitfähigkeit notwendig.

2.4.1 Die Model-in-the-Loop Simulation

Die Model-in-the-Loop Simulation steht beim Reglerentwicklungsprozess an erster Stelle. Ausgehend von einem Motormodell werden auf höchster Abstrahierungsebene das Regelungsschema und die Führungsgrößen definiert. Der Einsatz einer MiL-Umgebung zur Entwicklung einer modellbasierten Regelung des dieselmotorischen Luftpfads mit zwei Abgasrückführstrecken wird in [38] beschrieben. Die Überprüfung des erstellten Reglers erfolgt ausschließlich im Rahmen der Simulationsumgebung mit einem Dymola-Streckenmodell. Der FTP-75-Testzyklus dient zur Validierung des Motormodells anhand von Messdaten. In [38] werden als Führungsgrößen für das Mehrgrößenregelsystem der Frischluftmassenstrom und der Ladedruck gewählt. Das mit Hilfe der

MiL-Simulation entwickelte modellbasierte prädiktive Regelungskonzept erreicht ein gutes Führungsverhalten durch die Berücksichtigung der Kopplungseffekte der Luftmassen- und Ladedruckregelung.

In [45] wird eine MiL-Simulationsumgebung zur Analyse unterschiedlicher Mehrgrößenregelstrukturen für den Luftpfad eines Dieselmotors verwendet. Zur Simulation des Luftpfads und der Verbrennung wird dabei ein MVM verwendet. In [1] wird die Entwicklung einer modellbasierten Regelung der Abgasrückführrate und des Ladedrucks in einer MiL-Umgebung vorgestellt. Hierbei dient ein detailliertes Gesamtmodell des Dieselmotors zur Simulation des Regelstreckenverhaltens. Die entwickelte Regelstruktur beinhaltet adaptierte Prozessmodelle, welche nicht-messbare bzw. nicht-gemessene Zustandsgrößen des Dieselmotors schätzen. Über das echtzeitfähige Motormodell werden die Frischluftmasse im Zylinder, die dynamische Abgastemperatur im Krümmer, der Druck vor Verdichter, der Druck nach Turbine und die Temperatur nach Ladeluftkühler errechnet. Die modellbasierte Ermittlung der Größen dient zur Verbesserung der Ladedruck- und Abgasrückführregelung. Durch die Verwendung der im Rahmen der MiL-Simulationsumgebung optimierten Luftpfadregelstrategie wird eine deutliche Reduktion der Stickoxidemissionen, als auch ein verbessertes Beschleunigungsverhalten erreicht.

2.4.2 Die Software-in-the-Loop Simulation

Eine Software-in-the-Loop Umgebung ermöglicht die Validierung des bereits für die Zielhardware kompilierten Steuergerätcodes. Im fortgeschrittenen Funktionsentwicklungsprozess besteht durch die SiL-Simulation bereits neben der Validierung der Steuergerätaggorithmen die Möglichkeit eine Grundapplikation in der Modellumgebung vorzunehmen.

In [28] wird die Kopplung zwischen einem Applikationstool und dem Funktionsmodell vorgestellt. Als Anwendungsbeispiel der virtuellen Applikation wird die saugrohrdruckbasierte Füllungserfassung eines Ottomotors aufgeführt. Ein selbstoptimierendes neuronales Netzwerk bestimmt während des Motorbetriebs die zur Motorregelung notwendige Frischluftmasse. Die Validierung und funktionelle Erweiterung des Algorithmus erfolgt in der Simulationsumgebung. Auch im Bereich der Bedatung von steuergerätfähigen Abgasnachbehandlungsmodellen wird die virtuelle Applikation bereits eingesetzt [10]. Über die Verwendung hochgenauer datengetriebener Modelle zur Berechnung der Verbrennungsvorgänge und vereinfachter Ansätze zur Simulation des Luftpfads und der Abgasnachbehandlung wird eine Übertragbarkeit des Datenstands auf Fahrzeug- und Motorprüfstandsversuche gewährleistet. In [73] wird

eine Vorgehensweise zur Bedatung von verbrennungsrelevanten Steuergrößen in der virtuellen Entwicklungsumgebung veröffentlicht. Über ein semiphysikalisches Modell werden Zündverzug, Verbrennungsschwerpunkt und Spitzendruck berechnet. In Verbindung mit einem Luftpfad- und Abgasnachbehandlungsmodell ist eine virtuelle Brennverfahrensapplikation möglich.

2.4.3 Die Hardware-in-the-Loop Simulation

Bei einem Hardware-in-the-Loop System wird der Funktionscode auf das Steuergerät übertragen und über eine elektrische Schnittstelle mit einem Echtzeitsimulationssystem verbunden. Abbildung 2.7 stellt ein HiL-System schematisch dar. Zur Modellierung des Motors wird in [29, 30] ein MVM verwendet.

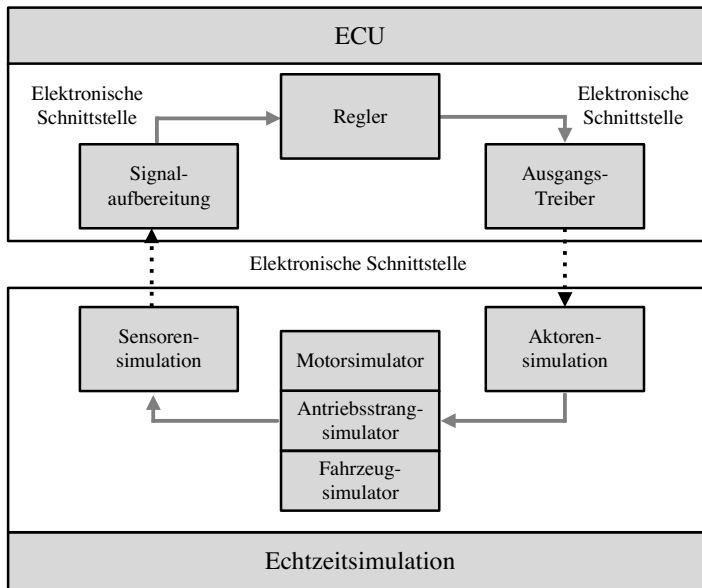


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung eines HiL-Systems aus [30]

Der Simulator basiert auf einer PC-Plattform und ermöglicht über eine cPCI-Verbindung eine Erweiterung auf bis zu 16 Module innerhalb des Racks. Die damit verbundene Rechenleistung ermöglicht die Simulation komplexer Systeme. Zur Kopplung des Steuergeräts an den Echtzeitsimulator werden reale Widerstandssensoren und PWM-Ausgänge verwendet.

Ein weiteres Hardware-in-the-Loop System zur Entwicklung der Motorregelung wird in [32] verwendet. Im Simulator wird ein nichtlineares, echtzeitfähiges Motormodell ausgeführt. Eine zusätzliche Vor- und Nachbereitung der Ein- und Ausgangsgrößen ermöglicht die Kopplung eines beliebigen Steuergeräts mit dem Modell. Unter Verwendung der Simulationsumgebung wird gezeigt, dass eine modellbasierte prädiktive Mehrgrößenregelung im Vergleich zu zwei voneinander getrennten Regelkreisen für die Führungsgrößen Luftmasse und Ladedruck ein verbessertes Regelverhalten in stationären und transienten Phasen ermöglicht. In [2] wird ein Fuzzy Mehrgrößenregelungssystem des Ladedrucks und der Luftmasse präsentiert. Die Entwicklung des Algorithmus erfolgt dabei ausschließlich virtuell im Rahmen der SiL- und HiL-Simulation. Über die Kopplung des Forschungssteuergeräts und einem echtzeitfähigen Motormodell wird der Funktionsrahmen erweitert.

Eine Zusammenfassung der Entwicklungsmethodik und der Regelgrößen für den Luftpfad aus der verwendeten Literatur ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Literaturüberblick Luftpfadregelungssysteme

Quelle	Umgebung	Führungsgrößen
[1]	MiL	m_L / p_2
[2]	SiL	m_L / p_2
[11]	-	m_L / O_2
[17]	MiL	p_2 / p_3
[20]	-	$dp/d\phi / m_L / p_2$
[22]	-	$NO_x / Ru\beta$
[32]	HiL	m_L / p_2
[38]	MiL	m_L / p_2
[45]	MiL	x_{AGR} / λ
[48]	-	$p_2 / p_3 / NO_x$
[49]	-	$\eta_i / NO_x / \text{Zündverzug}$
[50]	-	p_2 / m_{AGR}
[55]	MiL	m_L / p_2
[57]	-	m_{AGR} / m_{Zyl}
[69]	MiL	O_2
[71]	-	m_L / p_2
[83]	-	λ / NO_x
[86]	-	O_2
[87]	-	x_{AGR} / p_2
[92]	-	$Ru\beta / NO_x$

Die modellbasierte Entwicklung der Luftpfadregelung unter Anwendung der MiL-, SiL- und HiL- Simulation ist bereits im Einsatz. Wie in [3, 11, 76, 86] nachgewiesen wird, ist zur Luftpfadregelung beider Brennverfahren neben dem Ladedruck der Sauerstoffgehalt im Einlasskrümmer eine entscheidende Führungsgröße. Zur Regelung beider Größen ist die Entwicklung eines Mehrgrößenregelungssystems erforderlich.

Simulationsgestützter Funktionsentwicklungsprozess
zur Regelung der homogenisierten Dieselerbrennung
Skarke, P.

2017, XXX, 156 S. 102 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-17114-8