

Vorwort des Herausgebers

Die Komplexität des verbrennungsmotorischen Antriebes ist seit über 100 Jahren Antrieb für kontinuierliche Aktivitäten im Bereich der Grundlagenforschung sowie der anwendungsorientierten Entwicklung. Die Kombination eines instationären, thermodynamischen Prozesses mit einem chemisch reaktiven und hochturbulenten Gemisch, welches in intensiver Wechselwirkung mit einer Mehrphasenströmung steht, stellt den technologisch anspruchsvollsten Anwendungsfall dar. Gleichzeitig ist das Produkt des Verbrennungsmotors aufgrund seiner vielseitigen Einsetzbarkeit und zahlreicher Produktvorteile für sehr viele Anwendungen annähernd konkurrenzlos. Nun steht der Verbrennungsmotor insbesondere aufgrund der Abgasemissionen im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Vor diesem Hintergrund ist eine weitere und kontinuierliche Verbesserung der Produkteigenschaften des Verbrennungsmotors unabdingbar.

Am Institut für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie wird deshalb intensiv an der Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors geforscht. Übergeordnetes Ziel dieser Forschungsaktivitäten ist die Konzentration auf drei Entwicklungsschwerpunkte. Zum einen ist die weitere Reduzierung der Emissionen des Verbrennungsmotors, die bereits im Verlauf der letzten beiden Dekaden um circa zwei Größenordnungen reduziert werden konnten aufzuführen. Zum zweiten ist die langfristige Umstellung der Kraftstoffe auf eine nachhaltige Basis Ziel der verbrennungsmotorischen Forschungsaktivitäten. Diese Aktivitäten fokussieren gleichzeitig auf eine weitere Wirkungsgradsteigerung des Verbrennungsmotors. Der dritte Entwicklungsschwerpunkt zielt auf eine Systemverbesserung. Motivation ist beispielsweise eine Kostenreduzierung, Systemvereinfachung oder Robustheitssteigerung von technischen Lösungen. Bei den meisten Fragestellungen wird aus dem Dreiklang aus Grundlagenexperiment, Prüfstandversuch und Simulation eine technische Lösung erarbeitet.

Die Arbeit an diesen Entwicklungsschwerpunkten bestimmt die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Instituts. Hierbei ist eine gesunde Mischung aus grundlagenorientierter Forschung und anwendungsorientierter Entwicklungsarbeit der Schlüssel für ein erfolgreiches Wirken. In nationalen als auch internationalen Vorhaben sind wir bestrebt, einen wissenschaftlich wertvollen Beitrag zur erfolgreichen Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors beizusteuern. Sowohl Industriekooperationen als auch öffentlich geförderte Forschungsaktivitäten sind hierbei die Grundlage guter universitärer Forschung.

Zur Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse dient diese Schriftenreihe, in der die Dissertationen des Instituts für Kolbenmaschinen verfasst sind. In dieser Sammlung sind somit die wesentlichen Ausarbeitungen des Instituts niedergeschrieben. Natürlich werden darüber hinaus auch Publikationen auf Konferenzen und in Fachzeitschriften veröffentlicht. Präsenz in der Fachwelt erarbeiten wir uns zudem durch die Einreichung von Erfindungsmeldungen und dem damit verknüpften Streben nach Patenten. Diese Aktivitäten sind jedoch erst das Resultat von vorgelagerter und erfolgreicher Grundlagenforschung.

Jeder Doktorand am Institut beschäftigt sich mit Fragestellungen von ausgeprägter gesellschaftlicher Relevanz. Insbesondere Nachhaltigkeit und Umweltschutz als Triebfedern des ingenieurwissenschaftlichen Handelns sind die Motivation unserer Aktivität. Gleichzeitig kann er nach Beendigung seiner Promotion mit einer sehr guten Ausbildung in der Industrie oder Forschungslandschaft wichtige Beiträge leisten.

In diesem Exemplar der Schriftenreihe berichtet Jan-Christoph Goos über die im Rahmen seiner Dissertation entwickelten, neuen Ansätze zur Optimierung von Steuerkennfeldern, -kennlinien und -skalaren aus Steuergeräten automobiler Antriebsstränge. Seine Optimierungsverfahren basieren auf Methoden der modellbasierten Kalibrierung, bei denen zu erst empirische Ersatzmodelle des Systems ermittelt werden, die dann in den vorgestellten Optimierungsansätzen verwendet werden.

Karlsruhe im September 2023

Prof. Dr. sc.-techn. Thomas Koch

Kurzfassung

In dieser Arbeit werden neue Ansätze zur Optimierung von Steuerkennfeldern, -kennlinien und -skalaren aus Steuergeräten des automobilen Antriebsstrangs beschrieben. Mit der Methodik der statistischen Versuchsplanung und empirischen Modellbildung können im Bereich der modellbasierten Kalibrierung eine Vielzahl der Kalibrierparameter eines Steuergerätes auf den Zielantriebsstrang und Zielmarkt angepasst werden. Die Optimierung der Parameter hinsichtlich der Zielgrößen und die Hinterlegung der optimierten Parameter in Kennfeldern und Kennlinien in Abhängigkeit des Antriebsstrangbetriebspunkts, die im Steuergerät verwendet werden, geschieht häufig in zwei sequenziellen Schritten. In diesem Fall bilden die Kennfelder, Kennlinien und Skalare im Steuergerät häufig nicht mehr das zuvor gefundene Optimum ab. Die vorgestellten Ansätze verwenden ein simultanes und direktes Verfahren, bei dem die Kennfelder und erstmals auch Kennlinien und Skalare des Steuergerätes hinsichtlich der Zielgrößen optimiert werden können. In den Ansätzen wird die Anzahl der Freiheitsgrade der Optimierung auf ein Minimum reduziert und gleichzeitig dabei die Flexibilität des Parameterwerteverlaufs der Kennfelder und Kennlinien nicht beschränkt. Zudem wird eine analytische Beschreibung des Gradienten und der Hessematrix für das Optimierungsproblem entwickelt. Mit diesen wird der Zeitbedarf einer Optimierung reduziert und die Anwendung des neuen, schnellen Optimierungsansatzes bei der Kalibrierung ermöglicht. Ein weiterer Ansatz wird vorgestellt, mit dem die Pareto-Front und damit der Zielkonflikt zwischen den verschiedenen Zielgrößen des Systems ermittelt wird. Die sich ergebenden Lösungen stellen Kalibriervorschläge der Kennfelder, Kennlinien und Skalare dar, die so in der Softwarefunktion des Steuergerätes hinterlegt werden können. Die Ansätze werden auf ein Beispiel aus der Fahrbarkeitskalibrierung angewendet, bei dem neben dem Komfort und der Dynamik des Antriebsstrangs ebenfalls die Emission des Verbrennungsmotors berücksichtigt wird.

Abstract

In this thesis, new techniques for the optimization of maps, curves and scalars of electronic control units for automotive powertrains are described. Various calibration parameters of electronic control units can be adjusted in order to suit the target powertrain as well as the requirements of a specific target market. The methods of design of experiment and empirical modelling can be used to support this process. This is usually done in two separate and sequential steps. First, the parameters are optimized with respect to the target criteria. Then, maps and curves are fitted to the optimized parameters. However, due to the sequential nature of the process, these maps and curves do not match the previously found optimal values exactly. The newly developed techniques use a direct optimization approach. For this, not only maps but also curves and scalars are simultaneously optimized with respect to the target criteria for the first time. The number of degrees of freedom for the optimization is reduced to a minimum with the new approaches without limiting the parameter value setting flexibility of the maps and curves. Additionally, the analytic gradient and the Hessian matrix are developed for the optimization problem. Therewith, the optimization time is reduced, such that the new and fast optimization approach can be used efficiently for calibration use cases. With another technique of this thesis, the pareto front can be found to visualize the trade-offs between the system's various target criteria. Each solution on the pareto front contains a full calibration for all maps, curves and scalars, which can be used directly in the software functions of the electronic control unit. The optimization techniques are applied to a drivability calibration example. In this example, the comfort and dynamic drivability criteria of the powertrain are optimized at the same time as the combustion engine emission.

1 Problemstellung und Zielsetzung

1.1 Problemstellung

Die Komponenten des Fahrzeugantriebsstrangs besitzen eine Vielzahl von elektronisch gesteuerten Aktoren, die über Softwarefunktionen in Steuergeräten bspw. die Kraftstoffeinspritzungen eines Verbrennungsmotors oder die Abgasnachbehandlung steuern [82]. Viele dieser Softwarefunktionen werden modular in verschiedenen Fahrzeugen, Antriebssträngen und Komponenten wie Verbrennungsmotoren verwendet. Sie enthalten verstellbare Parameter, mit deren Hilfe bspw. Verbrennungsmotoren im Sinne des gewünschten Verhaltens optimal betrieben werden.

Der Prozess der Bedatung dieser Funktionen mit Parametern, die für den Zielantriebsstrang und das Zielfahrzeug geeignet sind, wird Kalibrierung genannt.¹ Da eine geeignete Kalibrierung dieser Steuer- oder Kalibrierparameter zumeist vom Betriebspunkt (BP) des Antriebsstrangs abhängig ist, werden diese Parameter in Kennfeldern (KF) oder Kennlinien (KL) in den Steuergeräten hinterlegt. Im Steuergerät wird während des Betriebs in Abhängigkeit des BP der einzustellende Parameterwert aus dem KF oder der KL ermittelt. Entsprechend sind die KF und KL zu kalibrieren.

Die Anzahl der Softwarefunktionen und die zu kalibrierenden Parameter haben in den vergangenen Jahren stetig zugenommen [166, S. 56]. Getrieben wird diese Entwicklung u.a. von den technologischen Weiterentwicklungen, von einer schärferen Emissionsgesetzgebung, von dem Bestreben nach weiterer Kraftstoffverbrauchsreduzierung sowie von der steigenden Anzahl an Betriebsmodi, die sich bspw. durch die zunehmende Komplexität des Antriebsstrangs und durch Hybridisierung ergeben. Darüber hinaus steigt mit zunehmender Diversifizierung die Vielfalt an Antriebsstrangvarianten und Fahrzeugderivaten. Diese erhalten in der Regel eine zielmarktspezifische Kalibrierung. Der steigende Aufwand erfordert die Verwendung von Methoden zur Ermittlung einer geeigneten Kalibrierung, die über die Anwendung einer einfachen Versuch-und-Irrtum-Methodik am Prüfstand hinausgehen.

¹ In dieser Arbeit wird für eine übersichtliche Schreibweise der Begriff Kalibrierung neben dem Prozess selbst auch für das Prozessergebnis und damit für die geeigneten Werte der Parameter verwendet.

Einen Ansatz zur Bewältigung des Aufwands bieten modellbasierte Kalibriermethoden. Dabei werden mit Hilfe mathematischer Modelle das Systemverhalten und somit der Einfluss der Kalibrierparameter auf die Zielgrößen beschrieben. Auf Basis dieser Modelle werden dann die optimalen Kalibrierparameter ermittelt [183, S. 104].

Prinzipiell existieren verschiedene Arten von Modellen [83, S. 1ff; 129, S. 15ff]. Während bei White-Box-Modellen das physikalische Verhalten auf Grundlage von mathematisch formulierten Naturgesetzen beschrieben wird, stellen Black-Box-Modelle datenbasierte Modelle ohne physikalischen Bezug dar, die den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgängen des Systems beschreiben. Erstere werden mittels theoretischer Modellbildung, letztere mit Hilfe von experimenteller Modellbildung ermittelt. Zudem existieren Zwischenstufen dieser Modelltypen, häufig als Light-Gray-Box- und Dark-Gray-Box-Modelle bezeichnet, bei denen unterschiedliche Ausprägungen der theoretischen und experimentellen Modellbildung angewendet werden [83, S. 6].

Für die modellbasierte Kalibrierung können verschiedene Typen von Modellen verwendet werden. In [138] wird bspw. im Bereich der Fahrbarkeitskalibrierung die Kalibrierung der Lastschlagdämpfungsfunktion mittels eines hybriden Zustandsraummodells, welches auf Differentialgleichungen zur Beschreibung des Antriebsstrangtorsionsverhaltens basiert, vorgestellt. Die Modellparameter werden mittels Identifikationsverfahren ermittelt. Dies entspricht in diesem Fall einer Light-Gray-Box-Modellierung. Black-Box-Modellansätze haben demgegenüber den Vorteil, dass diese flexibler auf verschiedene Aufgabenstellungen angewendet werden können, während bei anderen Modelltypen die mathematisch formulierten Gleichungen speziell für das zugrundeliegende physikalische Verhalten entwickelt werden müssen. Ein Nachteil von White- und Gray-Box-Modellansätzen ist zudem die benötigte größere Rechenleistung für die Auswertung der Modelle. Da die Optimierungsverfahren der Steuerkennfelder und -kennlinien flexibel auf viele Aufgabenstellungen angewendet werden sollen, werden bei den in dieser Arbeit entwickelten Optimierungsverfahren ausschließlich Black-Box-Modellansätze verwendet. Diese sind im Bereich der modellbasierten Kalibrierung der am häufigsten verwendete Modelltyp und die Modellauswertung dauert in der Regel mit einem bei der Kalibrierung verwendeten Rechner zudem nur wenige Millisekunden [166, S. 57].

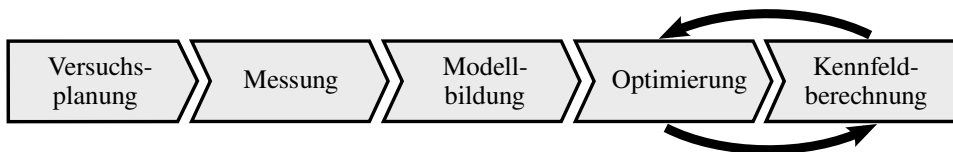


Abbildung 1.1: Alter Prozess der modellbasierten Kalibrierung mit sequenzieller Optimierung und Kennfeldberechnung (in Anlehnung an [67, S. 183])

In Abbildung 1.1 ist der klassische Prozess der modellbasierten Kalibrierung dargestellt [11, S. 7; 57, S. 1047; 121, S. 38ff; 122, S. 190; 165, S. 31; 98, S. 9f]. Im ersten Schritt der Versuchsplanung werden die zu vermessenden Kombinationen an Kalibrierparametern festgelegt. Zudem werden die Betriebsbereiche oder BP definiert, an denen die Kalibrierparameter variiert werden sollen. Hierbei werden Methoden der statistischen Versuchsplanung verwendet. Bei einer hohen Anzahl an zu vermessenden Kalibrierparametern ermöglichen diese mit einem vertretbaren Versuchsumfang empirische Black-Box-Modelle zu erstellen, die das Systemverhalten zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen in adäquater Qualität beschreiben. Die zu vermessenden Kalibrierparameterkombinationen werden dabei so in dem Versuchsraum verteilt, dass diese möglichst viel Information für die Modellschätzung liefern (vgl. Abschnitt 2.1).

Die in der Versuchsplanung festgelegten Parameterkombinationen werden am Prüfstand automatisch eingestellt und die Zielgrößen des Systems gemessen. Nach dem Versuch erfolgt eine Datenplausibilisierung, bei der fehlerhafte Messungen identifiziert und entfernt oder neu vermessen werden, bevor aus den aufgezeichneten Daten die empirischen Modelle der Zielgrößen geschätzt werden (vgl. Abschnitt 2.2).

Im Anschluss werden auf Basis der ermittelten Modelle die optimalen Werte der Kalibrierparameter gesucht. Da die Kalibrierung vom BP abhängt, werden BP definiert, an denen die Optimierung durchgeführt wird. Die BP werden dabei entweder auf die Stützstellen der KF bzw. KL der Kalibrierparameter gelegt oder mit Hilfe einer Clusteranalyse ermittelt, um bei der Optimierung möglichst repräsentative BP des Antriebsstrangs zu nutzen [110]. Abbildung 1.2 zeigt ein Beispiel mit vier Kalibrierparametern, die in zwei KF und KL hinterlegt sind und bei dem sich die Auswahl der zu optimierenden BP an den Kennfeldstützstellen des ersten Parameters orientiert.

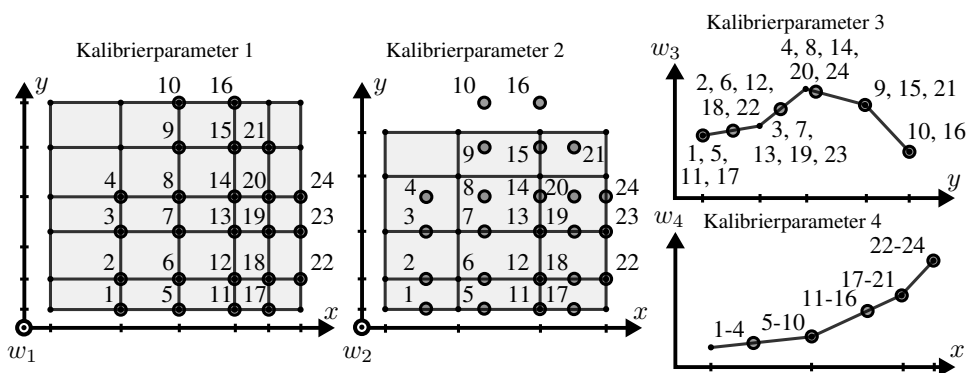


Abbildung 1.2: Beispiel für die Definition von Betriebspunkten zur Optimierung von Kalibrierparametern

An den ausgewählten BP erfolgt dann die eigentliche Optimierung (vgl. Abbildung 1.1). Dabei wird beim klassischen Prozess an jedem BP ein Optimierungsproblem gelöst, bei dem zu- meist eine Zielgröße auf Basis eines empirischen Modells optimiert wird. Weiterhin werden Grenzen für andere modellierte Größen definiert, die bei der Optimierung einzuhalten sind. Hiermit wird bspw. sichergestellt, dass die Verbrauchs- oder Emissionsgrenzen eingehalten werden oder der Antriebsstrang nicht überbelastet oder beschädigt wird. Da die mathematische Gleichung eines empirischen Black-Box-Modells auf keinem dem Anwendungsbeispiel ent- sprechenden physikalischen Wirkprinzip beruht, ist diese lediglich innerhalb des untersuchten Versuchsraums auszuwerten. Eine Extrapolation außerhalb des Versuchsraums ist somit im Gegensatz zu den auf mathematisch formulierten Naturgesetzen basierenden White- und Light- Gray-Box-Modellen zu vermeiden [50]. Aus diesem Grund wird der Versuchsraum bei der Optimierung als weitere Beschränkung berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.3). Das Ergebnis der Optimierung liefert schließlich optimale Kombinationen von Werten der Kalibrierparameter, wobei jeweils eine Kombination für einen BP gilt.

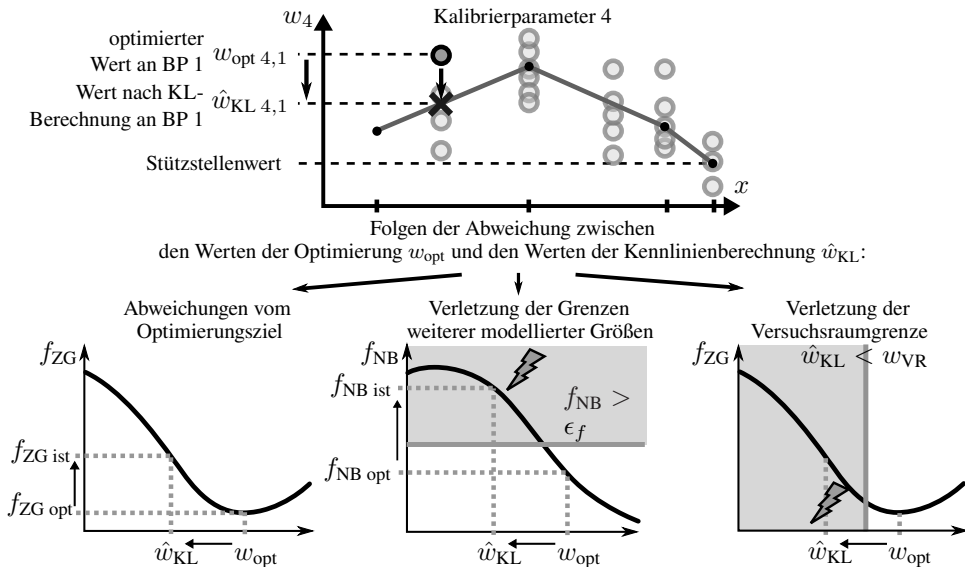


Abbildung 1.3: Abweichungen zwischen optimierten und aus der Kennlinienberechnung resultierenden Kalibrierparameterwerten und deren Folgen

Für jeden Kalibrierparameter wird im letzten Schritt das KF, die KL oder der Skalar (SK) be- rechnet, der im Steuergerät hinterlegt wird (vgl. Abbildung 1.1 und [140, S. 74ff; 98, S. 144ff; 160, S. 88]). Somit sind in diesem Schritt geeignete Werte an den Kennfeld- oder Kennlinien- stützstellen zu finden. Nicht immer können die zuvor optimierten Kalibrierparameterwerte an den BP exakt in das KF oder die KL mit den vorgegebenen Stützstellenpositionen hinterlegt werden. In diesem Fall muss ein Kompromiss gefunden werden. Für den vierten Kalibrierpa- rameter aus Abbildung 1.2 sind bspw. die Werte an den 24 BP aus der Optimierung in Abbildung

1.3 dargestellt. Die vier Stützstellenwerte der KL an den vorgegebenen Stützstellenpositionen sind nun so zu wählen, dass die optimierten Betriebspunktwerte möglichst exakt getroffen werden. Häufig wird hierbei eine Lösung für die Stützstellenwerte ermittelt, welche die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen den zuvor optimierten Betriebspunktwerten und den in der KL interpolierten Werten minimiert [190; 32]. Zudem wird häufig aus Gründen der Fahrbarkeit eine gewisse Kennfeld- bzw. Kennlinienglattheit gefordert, die je nach Ansatz ebenfalls bei der Berechnung der Stützstellenwerte berücksichtigt wird [190; 32; 109, S. 64ff; 98, S. 144ff; 140, S. 74ff; 160, S. 87ff; 72, S. 94ff; 132, S. 15ff; 133].

Für den Fall, dass nicht alle der zuvor bei der Optimierung gefundenen Betriebspunktwerte der Kalibrierparameter exakt durch das KF oder die KL interpoliert werden können oder eine nachträgliche Glättung der KF oder KL erfordert wird, unterscheiden sich die zuvor aus der Optimierung ermittelten Werte an den BP von den bei der Kennfeld- bzw. Kennlinienberechnung ergebenden interpolierten Betriebspunktwerten (vgl. Abbildung 1.3). Folglich entstehen Abweichungen zum ursprünglich ermittelten Optimierungsziel. Der durch die Optimierung ermittelte Wert für die Zielgröße, wie bspw. der Kraftstoffverbrauch, wird somit mit der im Steuergerät hinterlegten Kalibrierung nicht mehr erreicht. Neben den Abweichungen vom eigentlichen Optimierungsziel können die Differenzen bei der Kennfeldberechnung ebenfalls dazu führen, dass die Nebenbedingungen der Optimierung verletzt werden. In diesem Fall werden zum einen die vorgegebenen Grenzen für weitere empirisch modellierte Zielgrößen nicht eingehalten. Zum anderen können die Versuchsraumgrenzen verletzt werden. Letzteres kann bspw. dazu führen, dass der Antriebsstrang mit der Kalibrierung nicht lauffähig ist oder beschädigt wird.

Um die im vorherigen Absatz beschriebenen Folgen der Abweichungen möglichst gering zu halten, werden weitere Optimierungsläufe bei hohen Abweichungen zwischen zuvor optimierten und den schlussendlich aus den berechneten KL oder KF interpolierten Betriebspunktwerten durchgeführt. Somit werden die Prozessschritte der Optimierung und Kennfeldberechnung wiederholt durchgeführt (vgl. Abbildung 1.1). Dabei wird bei der Optimierung mit Hilfe verschiedener Ansätze versucht, diese Abweichungen in den Werten nicht zu hoch werden zu lassen. Ein Ansatz ist bspw. bei der Optimierung die Änderung der Kalibrierparameterwerte zwischen benachbarten BP zu beschränken oder diese in der Zielfunktion zu berücksichtigen. Damit steigt die Komplexität und auch der Zeitbedarf der Optimierung, wenn diese nicht mehr für jeden BP separat, sondern eine Optimierung der Kalibrierparameterwerte gleichzeitig an allen BP durchgeführt wird [160, S. 87ff].

Letztendlich können jedoch die Abweichungen bei sequenzieller Optimierung und Kennfeldberechnung meist nur verringert werden. Bleibende Abweichungen haben dann die bereits beschriebenen Auswirkungen zur Folge (vgl. Abbildung 1.3). Hohe Abweichungen entstehen insbesondere dann, wenn einige der Kalibrierparameter in KF und andere in KL oder SK im Steuergerät hinterlegt sind oder sich die Stützstellenpositionen der KF und KL voneinander

unterscheiden. Bisherige Optimierungsansätze sind zudem primär auf die Kalibrierung von KF ausgelegt, sodass Steuergerätfunktionen, die KF, KL und SK beinhalten, nicht geeignet modellbasiert kalibriert werden können.

1.2 Zielsetzung

Um die Nachteile der sequenziellen Optimierung und Kennfeldberechnung zu vermeiden, kann die Optimierung der KF, KL und SK der Kalibrierparameter direkt erfolgen. Solche simultanen und direkten Optimierungsansätze stellen das Thema dieser Arbeit dar. In Abbildung 1.4 ist für diesen Fall der angepasste Prozessablauf der modellbasierten Kalibrierung dargestellt. Die in der Modellbildung generierten empirischen Modelle der Zielgrößen in Abhängigkeit der Kalibrierparameter werden genutzt, um bei der Optimierung direkt eine Kalibrierung der KF, KL und SK der Parameter zu finden. Dabei kann neben den Modellen der Zielgrößen zusätzlich die Glattheit der KF und KL als weiteres Kriterium bei der Optimierung berücksichtigt werden, sodass die so optimierten KF und KL den Glattheitsanforderungen entsprechen. Einige Ansätze dieser direkten Optimierungsmethoden wurden bereits entwickelt [100; 109; 190; 25; 133; 156]. Einer der Nachteile der meisten bisherigen Ansätze ist der hohe Zeitbedarf bei der Optimierung, der durch die hohe Anzahl an Freiheitsgraden entsteht. Weiterhin optimieren alle bisherigen Ansätze nur Kalibrierparameter, die in KF hinterlegt sind. Ansätze, die die Optimierung von Funktionen mit Kalibrierparametern ermöglichen, die gemischt in KF, KL und SK hinterlegt sind, existieren bisher nicht. Bei allen bisherigen Methoden entstehen dabei wiederum Abweichungen zwischen den optimierten Betriebspunktwerten und den schlussendlich in KL oder KF interpolierten Werten, wenn die Modelle an mehreren BP ausgewertet werden sollen, als für die Berechnung der KL und KF erforderlich sind.

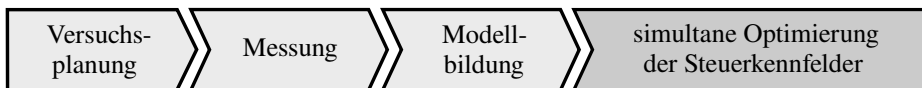


Abbildung 1.4: Prozess der modellbasierten Kalibrierung mit simultaner Optimierung der Steuerkennfelder (in Anlehnung an [66, S. 91])

In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der eine schnelle Optimierung der Kalibrierparameterkennfelder, -kennlinien und -skalare ermöglicht. Dieser generiert exakte Vorhersagen der Zielgrößen mittels der empirischen Modelle unabhängig von den Verteilungen der Kennfeld- und Kennlinienstützstellen und unabhängig von der definierten Verteilung der Betriebspunkte, an denen die Zielgrößen ausgewertet und optimiert werden sollen (vgl. Abbildung 1.2). Alle für die Zielgrößen ausgewerteten Betriebspunktwerte der Kalibrierparameter werden stets exakt in den optimierten KF, KL und SK eingehalten. Der Ansatz ist damit flexibel auf alle Steuergerätfunktionen anwendbar, bei denen KF, KL und SK kalibriert werden.