

Technische Universität München
Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Bauphysik

Modellbasierte Applikation der Klimaregelung für thermischen Komfort im Fahrzeug

Patrick Björn Jahn

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer
2. Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Die Dissertation wurde am 12.04.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt am 09.08.2021 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand in der Klimatisierungsabteilung der BMW Group. Während dieser Zeit fand ich ideale Voraussetzungen vor. Dies wurde erst durch eine Vielzahl an Menschen ermöglicht, bei denen ich mich bedanken möchte.

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing Klaus Peter Sedlbauer für die Betreuung meiner Dissertation und seine stets präzise Kritik und seine ermutigenden Rückmeldungen bedanken. Ebenso möchte ich mich bei Dr.-Ing Roland Göttig für seine Navigationshilfe durch die Promotion und seine inspirierenden Anwendungsideen bedanken. Außerdem danke ich Prof. Dr.-Ing. André Borrmann für das Übernehmen des Prüfungsvorsitzes und Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer für seinen Dienst als 2. Prüfer.

Meinem Betreuer bei BMW Dr. Stefan Zemsch danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir überlassenen Freiheiten in der Ausgestaltung meiner Arbeit. Zudem bedanke ich mich für die uneingeschränkte Unterstützung bei der Umsetzung der Arbeit und etwaigen administrativen Problemen sowie den hilfreichen Ratschlägen, um in der Welt von BMW zurecht zu kommen. Meinem Mentor Dr. Florian Preuß danke ich für seine wertvollen Tipps zur Weiterentwicklung der Arbeit und für die motivierende Wirkung seines kalten Atems in meinem Nacken. Außerdem danke ich Dr. Victor Norrefeldt vom Fraunhofer Institut für Bauphysik für zahlreiche Diskussionen zur wissenschaftlichen Ausrichtung und Erarbeitung dieser Arbeit und seiner Unterstützung im Umgang mit IESS.

Zahlreiche Studenten haben durch ihre Arbeit zum Erfolg dieser Dissertation beigetragen. Ich bedanke mich bei Nicolas Kiesel, Lisa Niedermaier, Kang Qiu und Xaver Niebauer für die großartige geleistete Arbeit. Ganz besonders bedanke ich mich bei Gerrit Lassahn für seinen unermüdlichen Einsatz und die stets fruchtbaren Diskussionen auf Augenhöhe.

Auch bei meinen kompetenten und jederzeit hilfsbereiten Kollegen bei BMW, insbesondere in den Gruppen für Funktionsentwicklung, Simulation und Applikation möchte ich mich herzlich bedanken. Saad Ahmed und Achim Stampflmeier danke ich für die Unterstützung bei den Innenraumsimulationen mit Taitherm. David Meier und Robert Semm für die Vermittlung von Elektronikkenntnissen, die mich erst in die Lage versetzt haben, ein Massenstrommesssystem zu entwerfen. Andreas Schneider danke ich für die tatkräftige Hilfestellung bei den notwendigen Arbeiten am Messsystem und dem Versuchsfahrzeug. Nicht zuletzt möchte ich meinem Leidensgenossen Wolfgang Wöhrle für seine mentale Unterstützung und das Weg freiräumen während der Promotion danken.

Darüber hinaus möchte ich meiner Familie danken. Danken für die uneingeschränkte Unterstützung und den Rückhalt während der Promotion. Zugleich entschuldige ich mich für meine seltenen Besuche zuhause und bedanke mich für das Ermöglichen meiner guten Ausbildung, die diese Arbeit erst möglich gemacht hat.

Zusammenfassung

Die Applikation der Klimaregelung ist ein aufwändiger Prozess und ein Zeittreiber der Automobilentwicklung. Durch die zunehmende Antriebsvielfalt und stets komplexer werdenden Klimatisierungssysteme, wird der Aufwand für die Applikation der Klimaregelung in Zukunft stark zunehmen. Bei anderen Regelungsproblemen innerhalb der Automobilindustrie wurde der konventionelle Applikationsprozess bereits durch einen modellbasierten Prozess ersetzt. Durch die hohe thermische Trägheit des Klimatisierungssystems lassen sich die dabei etablierten Ansätze insbesondere im Bereich der Modellierung jedoch nicht auf das Klimatisierungssystem übertragen. Es ist kein Modellierungsansatz bekannt, der für einen modellbasierten Applikationsprozess der Klimaregelung geeignet ist.

Um diese Wissenslücke zu schließen, wurde ein neuer modularer Modellierungs- und Optimierungsansatz auf der Basis von Black-Box Modellen und evolutionären Algorithmen entwickelt. Mithilfe der erzeugten Modelle wurde für ein Serienfahrzeug ein Beispiel eines modellbasierten Applikationsprozesses durchgeführt und die Ergebnisse mit dem entsprechenden Serienstand verglichen. Dazu wurde zunächst nur ein stark eingeschränkter Funktionsumfang unter quasistationären Bedingungen betrachtet.

Das Modell wurde in die drei Module Regler, Klimagerät und Innenraum aufgeteilt. Die Module für das Klimagerät und den Innenraum basieren auf Black-Box Modellen. Aus den Aussagen über die Gleichgewichtszustände wird mittels verschiedener PT-1 Glieder ein zeitlicher Verlauf konstruiert. Die Datengrundlage für die Black-Box Modelle sind experimentelle Messungen im Fall des Klimagerätes und Simulationsergebnisse im Fall des Innenraums. Bei verschiedenen Validierungsfahrten konnte das Gesamtmodell die Innenraumtemperatur über einen weiten Betriebsbereich mit weniger als 3 K Abweichung bestimmen.

Als Minimalbeispiel wurden drei Sets von Applikationsparametern ausgewählt. Diese Sets bestehen aus verschiedenen Kennlinien und Kennfeldern aus der Regelung und haben direkten Einfluss auf die Hauptfunktion der Klimaregelung. Die Applikationsparameter wurden für stationäre Betriebspunkte optimiert. Ein evolutionärer Algorithmus kam zum Einsatz, um die Stützpunkte der Applikationsparameter zu optimieren. Als Zielfunktion kamen Zielwerte für die Lufttemperatur im Kopfbereich zum Einsatz. Dies diente als vereinfachtes Maß für den thermischen Komfort im Fahrzeug.

Die erzeugten Applikationen wurden in Validierungsfahrten mit der Serienapplikation verglichen. Dabei wurden durchgängig ähnlich gute Ergebnisse wie mit dem durch erfahrene Versuchingenieure erstellten Serienstand gemessen. Diese Arbeit kann daher als Machbarkeitsnachweis für eine modellbasierte Applikation der Klimaregelung im Fahrzeug angesehen werden. Zugleich eröffnet der vorgestellte Modellierungsansatz zahlreiche Möglichkeiten für weitere Untersuchungen.

Abstract

The calibration of the Heating Ventilation and Air Conditioning (HVAC) system is a cumbersome process and a major part of the automotive development process. The increasing amount of powertrain variants and the increasing complexity of the HVAC systems are set to further magnify the efforts for the calibration process. Other control areas within the domain of automotive engineering have already replaced the conventional calibration process by a model-based process. Because of the high thermal inertia within the HVAC system, the developed approaches cannot be applied to the HVAC system. This holds especially for the system modelling. There is no known modelling approach for the HVAC system that is suitable for a model-based calibration process.

To close this gap in the existing knowledge, a new, modular modelling approach for an automotive HVAC system has been developed. This model is based on black-box models. With the developed model, a model-based calibration process for a series production vehicle has been conducted and the results were compared to the results of the conventional process. To reduce the scope of the investigation, only a limited set of calibration parameters has been investigated and only steady state operating points have been considered.

The model consists of three modules. The controller, the HVAC unit, and the cabin. The modules for the HVAC unit and the cabin are based on black-box models. From the steady state predictions, a transient prediction is derived by means of various PT-1 elements. For the HVAC unit, experimental data are used as training data. For the cabin module, simulation results are used as training data. In various validation rides, the model could predict the cabin temperature over a wide range of operating points with less than 3 K deviation.

As a minimal example, three sets of calibration parameters were selected. These sets consist of different lines and maps and have a direct influence on the main function of the HVAC controller. A genetic algorithm was used for the optimization and the calibration parameters were represented by their supporting points. As the fitnessfunction, the deviation from target values for the air temperature in passenger head area was selected. This function was used as a simplified measure for thermal comfort.

The created calibrations were compared to the series version using validation rides. Throughout all validation drives, the quality of the created calibration was on the same level as the series calibration. Therefore, this work is considered the proof of feasibility of a model-based calibration process for an automotive HVAC system. At the same time the presented modelling approach enables various further studies.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I	
Tabellenverzeichnis	IV	
Abkürzungsverzeichnis	V	
Symbolverzeichnis	VI	
1	Einleitung	2
1.1	Lösungsansätze	3
1.2	Ansatz modellbasierte Applikation	4
1.3	Ziel der Arbeit	5
1.4	Aufbau der Arbeit	6
2	Grundlagen und Stand des Wissens	7
2.1	Fahrzeugklimatisierung	7
2.1.1	Systembeschreibung	7
2.1.2	Teilsysteme	9
2.1.3	Regelung	11
2.2	Modellbasierte Applikation	13
2.3	Thermischer Komfort	15
2.3.1	Statistische Modelle	16
2.3.2	Physiologische Modelle	18
2.3.3	Herstellerziele	19
2.4	Black-Box Modelle	20
2.4.1	Bewertungsmetriken für Black-Box Modelle	22
2.4.2	Künstliche Neuronale Netze	22
2.4.3	Gauß Prozess Regression	24
2.4.4	Entscheidungswälder	24
2.4.5	Andere Klassen	25
2.4.6	Dimensionsreduktion	25
2.5	Statistische Versuchsplanung	26
2.5.1	Quasi zufällige Folgen	27
2.5.2	Lateinische Quadrate	27
2.5.3	Bewertungskriterien	27

2.6	Numerische Optimierungsmethoden	28
2.6.1	Gradientenbasierte Algorithmen	29
2.6.2	Evolutionäre Algorithmen	30
2.6.3	Andere Algorithmen	31
3	Methode	32
3.1	Modellierungsansatz	35
3.1.1	Klimagerät	39
3.1.2	Innenraum	50
3.1.3	Sensorik	54
3.1.4	Regelung	56
3.1.5	Korrekturen	57
3.2	Zielfunktion	57
3.2.1	Klimakomfort Modellierung	58
3.2.2	Auswahl der Betriebspunkte	60
3.2.3	Gewichtung der Betriebspunkte	60
3.3	Optimierung	60
3.3.1	Auswahl der Applikationsparameter	62
3.3.2	Format der Applikationsparameter	64
3.3.3	Optimierungshyperparameter	64
3.4	Applikationsumgebung und Modellbildung	65
4	Validierung der Modelle	68
4.1	Einzelmodule	68
4.1.1	Regler	68
4.1.2	Klimagerät	70
4.1.3	Innenraum	75
4.2	Teilsysteme	85
4.2.1	Regler-Klimagerät	85
4.2.2	Klimagerät-Innenraum	87
4.3	Gesamtsystem	90
4.3.1	IESS	90
4.3.2	Taitherm	94
4.3.3	Vergleich zur theoretischen Genauigkeit der Klimagerätmodelle	97
5	Ergebnisse und Interpretation	100
5.1	Einfluss der Variablenanzahl	100

Inhaltsverzeichnis

5.2	Applikationsergebnisse	101
5.2.1	IESS-Modell	102
5.2.2	Taitherm-Modell	115
5.2.3	Zusammenfassung	127
6	Evaluierung der Methode	129
6.1	Bewertung des Modellierungsansatzes	129
6.2	Bewertung des Applikationsansatzes	131
6.3	Bewertung der vorliegenden Arbeit	132
7	Zusammenfassung	134
8	Ausblick	137
8.1	Verbesserungen/Untersuchungen	137
8.2	Erweiterungen und Adaptionen	139
8.2.1	Zusätzliche Teilsysteme	139
8.2.2	Multikriterielle Optimierung	139
8.2.3	Hardwareentwicklung	140
8.2.4	Regelungsentwicklung	141
8.2.5	Forschung zur thermischen Behaglichkeit	142
8.3	Entwicklung zur Serienanwendung	142
8.3.1	Aufteilung der Modelle	143
8.3.2	Datenquellen	143
9	Literaturverzeichnis	144

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Schema des modellbasierten Applikationsprozesses	3
Abbildung 2. Schema eines luftseitig geregelten Heizklimagerätes	8
Abbildung 3. Querschnittsansicht eines Klimagerät CAD Modells.....	9
Abbildung 4. Schema eines idealen Kaltdampfprozesses und zugehöriges T-s Diagramm, aus [12].....	10
Abbildung 5. Einordnung der Applikation eines Dieselmotors in den Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs, aus [20].....	13
Abbildung 6. Übergang von konventioneller Applikation zu modellbasierter Applikation	13
Abbildung 7. PPD Index als Funktion des PMV	17
Abbildung 8. Sommer Komfortzonen nach Nilsson [34].....	18
Abbildung 9. Vorrichtung zur Messung der Lufttemperatur im Fußraum	20
Abbildung 10. Schematische Darstellung der Qualitätsbestimmung von Black-Box Modellen	21
Abbildung 11. Schema eines feedforward Netzwerks mit einer versteckten Schicht	23
Abbildung 12. Ein binärer Entscheidungsbaum mit vier Ebenen	25
Abbildung 13. Unterscheidung von lokalen und globalen Minima	29
Abbildung 14. Versuchsfahrzeug BMW 6er GT	33
Abbildung 15. Klimatisierungssystem des BMW 6er GT mit 2,5 Zonen Klimaanlage	34
Abbildung 16. Schema des Modellierungsansatzes für das Klimatisierungssystem	37
Abbildung 17. Approximation des transienten Verlaufs aus den Ergebnissen des Gleichgewichtsmodells.....	38
Abbildung 18. Schema des Klimagerät Simulationsmoduls.....	39
Abbildung 19. Versuchsaufbau im Fahrzeug	40
Abbildung 20. Querschnitt der Massenstromaufsätze	41
Abbildung 21. Strömungsgleichrichter.....	42
Abbildung 22. Heißfilmanemometer	43
Abbildung 23. Schema des Auswahlprozesses für ein Black-Box Modell	46
Abbildung 24. Validierung eines Black-Box Modells am Beispiel der Belüftungstemperatur der Fahrerseite	47
Abbildung 25. Gesamtmassenstrom in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit	49
Abbildung 26. Ablauf zur Erzeugung der Varianten des Innenraummoduls	51
Abbildung 27. IESS Simulationsergebnis.....	52
Abbildung 28. Modellierung in Star CCM+	54
Abbildung 29. Positionierung des Solarsensors.....	55
Abbildung 30. Ermessene Richtcharakteristik des Solarsensors der Fahrerseite	56
Abbildung 31. Schema zur Bewertung einer Klimaregelung.....	57
Abbildung 32. Visualisierung der zulässigen Temperaturbereiche für eine Einstellung von 22 °C	59
Abbildung 33. Lokales Gütegebirge für zwei Designvariablen.....	61
Abbildung 34. Lokale Gütefunktion mit minimaler Schrittgröße	62

Abbildung 35. Vereinfachter Ausschnitt der Reglerkaskade	63
Abbildung 36. Bedienoberfläche der Applikationsumgebung.....	66
Abbildung 37. Validierung des Reglermoduls für die Ansteuerung der vorderen Mischluftklappe für die Fahrerseite.....	69
Abbildung 38. Vergleich der Ausblastemperatur und der vorhergesagten Gleichgewichtswerte	71
Abbildung 39. Vergleich der Ausblastemperatur für eine Validierungsfahrt.....	73
Abbildung 40. Abweichung ausgewählter Ausblastemperaturen im Laufe der Zeit.....	74
Abbildung 41. Vergleich der Regelkurve nach Herstellerangaben und der Simulation für die Belüftungstemperatur auf der Fahrerseite	75
Abbildung 42. Gemessene und simulierte (gestrichelte Linien) Innenraumtemperaturen des IESS-Moduls	77
Abbildung 43. Abweichung zwischen gemessener und simulierter Temperatur für das IESS-Modul	78
Abbildung 44. Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Innenraumtemperaturen im Taitherm-Modul	79
Abbildung 45. Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Innenraumtemperaturen im Taitherm-Modul	80
Abbildung 46. Gemessene und simulierte (gestrichelte Linien) Lufttemperaturen während der Fahrt.....	81
Abbildung 47. Abweichung zwischen gemessener und simulierter Temperatur.....	82
Abbildung 48. Vergleich zwischen gemessener und simulierter Temperatur für den Straßenversuch und das Taitherm-Modul	83
Abbildung 49. Abweichung zwischen gemessener und simulierter Temperatur.....	84
Abbildung 50. Vergleich der gemessenen und der simulierten Aktuatorsignale	86
Abbildung 51. Abweichung der Ausblastemperaturen	87
Abbildung 52. Vergleich der gemessenen und errechneten Innenraumtemperaturen mit dem IESS-Innenraummodul.....	88
Abbildung 53. Vergleich der gemessenen und errechneten Innenraumtemperaturen mit dem Taitherm-Innenraummodul.....	89
Abbildung 54. Vergleich des gemessenen und simulierten Reglerverhaltens	91
Abbildung 55. Vergleich der simulierten und gemessenen Ausblastemperaturen.....	92
Abbildung 56. Abweichung zwischen simulierter und gemessener Lufttemperatur	93
Abbildung 57. Vergleich ausgewählter Reglergrößen zwischen Simulation (gestrichelte Linie) und Messung	94
Abbildung 58. Vergleich der simulierten (gestrichelte Linien) und gemessenen Ausblastemperaturen	95
Abbildung 59. Vergleich zwischen simulierten (gestrichelte Linien) und gemessenen Lufttemperaturen	96
Abbildung 60. Vergleich der Konvergenzverläufe für die drei Optimierungsfälle.....	101
Abbildung 61. Veränderung der Applikationskennlinie durch die Optimierung	102
Abbildung 62. Histogramm der erreichten Zielwerte für die relevanten Betriebspunkte.....	103
Abbildung 63. Verlauf der simulierten Temperaturen für fünf ausgewählte Betriebspunkte	104

Abbildung 64. Vergleich der gemessenen Kopfhöhentemperatur für die Serienapplikation und die optimierte Applikation	105
Abbildung 65. Veränderung der ersten Kennlinie während der Optimierung.....	106
Abbildung 66. Veränderung der zweiten Applikationskennlinie nach der Optimierung	107
Abbildung 67. Histogramm des erreichten Zielwertes je individuellem Betriebspunkt.	108
Abbildung 68. Vergleich der gemessenen Innenraumtemperaturen.....	109
Abbildung 69. Veränderung der ersten Kennlinie während der Optimierung.....	110
Abbildung 70. Veränderung der zweiten Kennlinie durch die Optimierung.....	111
Abbildung 71. Veränderung des ersten Kennfeldes durch die Optimierung	112
Abbildung 72. Veränderung des zweiten Kennfeldes durch die Optimierung	112
Abbildung 73. Histogramm der erreichten Zielwerte	113
Abbildung 74. Vergleich der gemessenen Innenraumtemperaturen in Kopfhöhe	114
Abbildung 75. Veränderung der Kennlinie durch die Optimierung	115
Abbildung 76. Histogramm der Zielwerte der einzelnen Betriebspunkte	116
Abbildung 77. Vergleich der gemessenen Lufttemperaturen für Serienapplikation und optimierte Applikation.....	117
Abbildung 78. Vergleich der Solltemperaturoffsetkennlinie.....	118
Abbildung 79. Vergleich der Schichtungskennlinie	119
Abbildung 80. Histogramm der erreichten Zielwerte	120
Abbildung 81. Vergleich der gemessenen Innenraumtemperaturen für Serienstand und optimierte Applikation	121
Abbildung 82. Veränderung der Solltemperaturoffset Kennlinie durch die Optimierung	122
Abbildung 83. Veränderung der Schichtungskennlinie durch den Optimierer	123
Abbildung 84. Vergleich der Kennfelder für die Belüftungsausblastemperatur Sollwerte.....	124
Abbildung 85. Vergleich der Kennfelder für die Fußausblastemperatur Sollwerte	125
Abbildung 86. Histogramm der erreichten Zielwerte bei den unterschiedlichen Betriebspunkten.....	126
Abbildung 87. Messergebnisse einer Validierungsfahrt für Fall 3 mit dem Taitherm-Modell.....	127
Abbildung 88. Ablauf zur Bewertung von Hardwareabweichungen	140
Abbildung 89. Ablauf zur Generierung von Hardwareanforderungen	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Interaktionen zwischen Klappen und Luftausströmern	34
Tabelle 2. Fehlerquellen im Massenstrommesssystem	43
Tabelle 3. Fehlerquellen im Temperaturmesssystem	44
Tabelle 4. Bedingungen zur Auswahl eines zusätzlichen Trainingspunktes.....	45
Tabelle 5. Limitierungen der Vorhersagewerte	50
Tabelle 6. Übersicht der Modelleingänge und -ausgänge.....	50
Tabelle 7. Betriebsbedingungen der Validierungsfälle	53
Tabelle 8. Grenzwerte für Lufttemperaturen im Fahrzeug für die Einstellung 22 °C	58
Tabelle 9. Übersicht der untersuchten Sets von Applikationsparametern	62
Tabelle 10. Verwendete Werte für die Hyperparameter.....	65
Tabelle 11. Ermittelte Standardabweichungen der Fehler der einzelnen Temperaturen in K	98

Abkürzungsverzeichnis

ANN	Künstliche neuronale Netze (engl. Artificial Neural Networks)
BP	BetriebsPunkt
CAD	Computer-Aided Design
DOE	Statistische Versuchsplanung (engl. Design Of Experiments)
DTS	Dynamic Thermal Sensation
GPR	Gauß Prozess Regression
HIL	Hardware in the Loop
HMI	Human Machine Interface
HPC	High Performance Computing
HVAC	Klimatisierung (engl. Heating Ventilation AirConditioning)
HWT	HeizWärmeTauscher
IESS	Indoor Environmental Simulation Suite
KFL	KlimaFunktionsLogik
KNN	Künstliche Neuronale Netze
MD	MittelDüse
OBD	OnBoard Diagnose
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Percentage People Dissatisfied
RANS	Raynold Averaged Navier Stokes
SD	Seitendüse
SOP	Produktionsbeginn (engl. Start Of Produktion)
SQP	Sequential Quadratic Programming
SVM	Support Vector Machine
UIF	Unbelüfteter InnenraumFühler
VEPZO	VEelocity Propagating ZOnal model

Symbolverzeichnis

Symbol	Erklärung
c	Konstante
e_i	Fehler
h_{cal}	Wärmeübergangskoeffizient
K	Konstante
m	Massenstrom
ME	Mean Error (Mittlere Abweichung)
n	Anzahl
q	dynamischer Druck
Q	Wärmestrom
R	Wärmewiderstand
RMSE	Root mean squared error (Mittlere quadratische Abweichung)
t	Zeit
T	Temperatur
T_{eq}	Äquivalenttemperatur
T_s	Oberflächentemperatur
SD	Standarddeviation (Standardabweichung)
v	Geschwindigkeit
Var	Varianz
x	Variable
y	Variable
Z	Zielwert
ρ	Luftdichte
τ	Zeitkonstante

1 Einleitung

Moderne Klimaregelungen im Automobilbereich basieren oftmals auf komplexen Reglerkaskaden aus gain scheduling Reglern. Bei dieser Art der Regelung kann das Verhalten der Regelung innerhalb einer festen Reglerstruktur über eine Vielzahl von Parametern, Kennlinien und Kennfeldern beeinflusst werden. Der Prozess des Festlegens dieser sogenannten Applikationsparameter wird als Applikationsprozess oder kurz Applikation bezeichnet. Manchmal wird dieser Vorgang auch als Kalibrierung bezeichnet. Das Set der auf ein spezifisches Fahrzeugmodell angepassten Applikationsparameter wird ebenfalls als Applikation oder auch als Bedatung des Fahrzeugs bezeichnet. Ziel des Applikationsprozesses ist es eine optimale Regelgüte mit der verfügbaren Hardware zu erreichen.

Die Bewertung der Regelgüte erfolgt auf der Basis einer Abwägung von zahlreichen Faktoren und unterscheidet sich von Hersteller zu Hersteller. Mögliche Kriterien, die in die Bewertung einfließen, sind:

- Thermischer Komfort
- Akustik
- Energieverbrauch
- Intuitive Bedienbarkeit und Verhalten
- Differenzierbarkeit verschiedener Modi
- Luftqualität
- Betriebssicherheit

Die Applikation wird von erfahrenen Versuchingenieuren in aufwändigen und langwierigen Erprobungskampagnen erzeugt. Während der Erprobungskampagnen werden Testfahrten unter verschiedenen klimatischen Bedingungen durchgeführt. Der Versuchingenieur befindet sich im Fahrzeug und bewertet die Qualität der aktuellen Applikation nach seinen subjektiven Wahrnehmungen der relevanten Aspekte. Mithilfe des Systemverständnisses leitet der Ingenieur mögliche Verbesserungen in den Applikationsparametern ab, implementiert diese auf dem Steuergerät des Fahrzeugs und überprüft die Auswirkungen auf das Reglerverhalten in weiteren Versuchsfahrten. Auf diese Weise wird die Applikation iterativ verbessert, bis unter allen vorgesehenen Betriebspunkten ein zufriedenstellendes Reglerverhalten sichergestellt ist. Dieser Prozess stellt einen großen und zeitkritischen Teil der Fahrzeugentwicklung dar. Der Wandel in der Automobilindustrie stellt neue Anforderungen an diesen Prozess. Durch den zunehmenden Kostendruck soll der Prozess weniger aufwändig werden. Zugleich erfordern die verkürzten Entwicklungszyklen eine zeitliche Straffung des Prozesses. Auf der anderen Seite nimmt durch die zunehmende Elektrifizierung der Antriebsstränge [1] die Variantenvielfalt zu. Außerdem steigt die Komplexität der Klimatisierungssysteme stetig. Es werden zunehmend neue Funktionen implementiert und zugleich bessere Ergebnisse erwartet. Diese Faktoren erhöhen den Aufwand für den Applikationsprozess.

Es bestehen mehrere Veränderungsmöglichkeiten um diesen Zielkonflikt zu lösen. Drei Ansätze wurden ausgewählt und werden im Folgenden kurz vorgestellt. Die Ansätze sind eine Vereinfachung des Regelproblems, ein modellbasierter Applikationsprozess und eine modellprädiktive Regelung.

1.1 Lösungsansätze

Vereinfachung des Regelproblems

Ein möglicher Ansatz ist die Komplexität des Regelproblems zu verringern. Dies kann entweder durch das Verringern der Anforderungen oder durch das Verbessern des Feedbacks geschehen. In beiden Fällen können nicht alle Anforderungen an den Applikationsprozess erfüllt werden.

Mit der Einführung zusätzlicher Feedbacksignale durch weitere Sensoren wäre eine deutliche Vereinfachung des Applikationsprozesses bei einer gleichzeitigen Verbesserung der Regelgüte denkbar. Dieser Erfolg wäre jedoch durch stark gestiegene Herstellkosten erkauft und erfüllt daher nicht die Anforderung der Kostensenkungen.

Modellbasierte Applikation

Ein modellbasierter Applikationsprozess oder auch modellbasierte Applikation zieht keine Veränderungen des Klimatisierungssystems nach sich. Stattdessen wird der Applikationsprozess verändert. Anstatt die Applikationsparameter iterativ durch Fahrzeugversuche zu bestimmen, werden die Parameter durch einen automatisierten Prozess anhand eines Modells bestimmt. Der Prozess besteht aus drei Schritten und ist in Abbildung 1 dargestellt. Zunächst wird das Ziel der Regelung definiert. Danach wird das System modelliert und im dritten Schritt eine Optimierung der Applikationsparameter auf Basis des Modells durchgeführt.



Abbildung 1. Schema des modellbasierten Applikationsprozesses

Mit dieser Methode lassen sich die Kosten und die Dauer des Applikationsprozesses minimieren. Gleichzeitig ergeben sich keine neuen Nachteile und es werden keine Änderungen an der Fahrzeughardware notwendig. Das Verfahren wurde für andere Regler in Fahrzeugen bereits erforscht und wird dort in Teilen angewandt. Die Anwendbarkeit auf das Klimatisierungssystem wurde bislang jedoch noch nicht untersucht.

Modellprädiktive Regelung

Einen Schritt weiter als ein modellbasierter Applikationsprozess geht das Konzept einer modellprädiktiven Regelung. Bei diesem Konzept wird keine Applikation mehr benötigt. Abhängig von den Sensorwerten und den vorgegebenen Zielen, bestimmt der Regler direkt die notwendigen Aktionen, um das Ziel zu erreichen. Diese Aktion wird in Echtzeit anhand eines Modells bestimmt.

Der Regler benutzt keine expliziten Regeln, die über Applikationsparameter an das jeweilige Fahrzeugmodell angepasst werden. Stattdessen ist der Regler anhand eines Modells in der Lage die Auswirkungen verschiedener Aktionen abzuschätzen und entsprechend die beste Aktion zu bestimmen. Diese Art der Regelung bietet viele Vorteile, setzt allerdings auch eine gesteigerte Rechenkapazität im Fahrzeug voraus. Dies ist wiederum mit höheren Herstellkosten verbunden.

1.2 Ansatz modellbasierte Applikation

Die modellbasierte Applikation erfüllt potenziell alle Anforderungen, die in der Zukunft an einen Applikationsprozess für das Klimatisierungssystem gestellt werden. Zudem bietet sich für diesen Prozess eine schrittweise Integration in die bestehenden Prozesse an. Daher wird der Ansatz in dieser Arbeit weiter untersucht. Die Vorteile der modellbasierten Applikation wurden bereits erkannt. Daher ist die modellbasierte Applikation in anderen Regelungsdisziplinen innerhalb der Fahrzeugtechnik bereits etabliert. Dies gilt insbesondere für die Regelung von Verbrennungsmotoren [2]. Aus diesem Grund sind bereits zahlreiche wissenschaftliche Beiträge zu dem Thema erschienen und es existieren auch Lehrbuchbeiträge. Der überwiegende Teil dieser Untersuchungen fand jedoch an anderen Systemen statt, die sich in ihrer zeitlichen Dynamik grundlegend von einem Klimatisierungssystem unterscheiden. Die präsentierten Ansätze zur Modellierung der Systeme beruhen auf der Annahme der sehr hohen zeitlichen Dynamik der Systeme. Diese Dynamik ist beim Klimatisierungssystem nicht gegeben. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf das Klimatisierungssystem ist daher fraglich und muss untersucht werden.

Wie in Abbildung 1 gezeigt wurde, besteht der Prozess der modellbasierten Applikation aus drei Schritten. Die Unterschiede zwischen den Systemen wirken sich auf alle drei Schritte aus. Die Definition des Regelungszieles stellt bereits eine Herausforderung dar, da dieses Ziel üblicherweise ein Kompromiss aus einer Vielzahl von teilweise gegensätzlichen und schwer zu quantifizierenden Einzelaspekten ist. Die Lösung dieses Problems ist nicht trivial und Gegenstand laufender Forschung. Für einen zielführenden Einsatz in der Praxis ist eine gute Zieldefinition allerdings unabdingbar. Dieser Schritt kann für die Untersuchung der modellbasierten Applikation jedoch ausgeklammert werden, da das jeweilige Ziel ersetzbar ist. Die modellbasierte Applikation stellt die Erfüllung eines beliebigen Zieles sicher. Daher ist es möglich zunächst ein vereinfachtes, möglichst objektives Ziel zu verwenden. Hierbei bietet sich insbesondere der Effekt des thermischen Komforts an, da dieser neben dem Sicherstellen der Betriebssicherheit die Hauptaufgabe des Klimatisierungssystems ist.

Im Schritt der Modellierung verhindern die Unterschiede der Systeme ein Übernehmen der etablierten Methodik. Insbesondere die hohe Trägheit des Klimatisierungssystems erfordert eine Anpassung der etablierten Techniken aus anderen Regeldisziplinen. Zum einen ist eine Übernahme der Techniken zur Systemidentifizierung nicht möglich, da die dazu notwendigen Versuche sowohl zeitlich als auch kostenseitig nicht praktikabel sind. Zum anderen erzeugt die Trägheit des Innenraums eine hohe Pfadabhängigkeit der Regelung und der sich einstellenden Gleichgewichtszustände. Eine Verwendung von quasistationären Modellen ist daher nicht möglich und es muss auf dynamische Modelle zurückgegriffen werden. Für den Schritt der Modellierung können die bestehenden Techniken daher nicht verwendet werden. Es müssen neue Methoden entwickelt werden.

Auch im Bereich der Optimierung gibt es Unterschiede. Diese sind durch die große Anzahl an Applikationsparametern und die sehr hohe Abhängigkeit zwischen den einzelnen Applikationsparametern begründet. Diese Abhängigkeit der Applikationsparameter wiederum ist durch die große Variabilität in den möglichen Betriebspunkten des Klimatisierungssystems begründet. Durch eine Einschränkung der betrachteten Betriebspunkte lässt sich dieser Unterschied jedoch minimieren. Durch eine begrenzte Betrachtung einzelner Applikationsparameter lässt sich der Einfluss der großen Anzahl an Applikationsparametern eliminieren. Daher erscheint auch im Bereich der Optimierung die Übernahme etablierter Techniken möglich.

1.3 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es die Wissenslücke über die Anwendbarkeit der modellbasierten Applikation auf träge Systeme in Form des Klimatisierungssystems zu schließen. Dazu wird ein geeignetes Fahrzeugmodell und eine Simulationsumgebung entwickelt und damit ein modellbasierter Applikationsprozess durchgeführt. Mithilfe dieser Simulationsumgebung sollen Anforderungen an die Modellqualität ermittelt werden. Dazu wird insbesondere auf die Anforderungen zur Abbildung der dynamischen Eigenschaften geachtet. Auch die Identifizierung von geeigneten Datenquellen für die Systemcharakterisierung des Klimatisierungssystems ist ein Ziel der Arbeit. Zugleich dienen diese Ergebnisse als Machbarkeitsnachweis für etwaige weiterführende Untersuchungen zur modellbasierten Applikation.

Wissenserkenntnisse zu möglichen Zielen der Fahrzeugklimatisierung bzw. Abwägungen zwischen verschiedenen, konkurrierenden Zielen gehören nicht zur Zielsetzung dieser Arbeit. In diesem Aspekt wird auf den Stand der Technik zurückgegriffen. Die Untersuchung der Einflüsse unterschiedlicher Optimierungsstrategien wird ebenfalls ausgeklammert. Sofern es für die Erfüllung des Zieles notwendig ist, werden vereinzelt auch verschiedene Optimierungsmethoden untersucht, sowie angepasst und die Ergebnisse entsprechend bewertet.

1.4 Aufbau der Arbeit

Zunächst werden die notwendigen Grundlagen und der aktuelle Stand des Wissens präsentiert. Danach wird die verwendete Methodik vorgestellt. Dabei wird zunächst das Versuchsfahrzeug, mit dem die Untersuchungen durchgeführt werden, vorgestellt. Außerdem werden in diesem Kapitel die Ansätze für die Modellierung, die Zielfunktion und die anschließende Optimierung dargelegt und die jeweiligen Entscheidungen begründet. In Kapitel 4 wird das erzeugte Modell und seine Einzelteile mit Daten aus Versuchsfahrten validiert. Die Ergebnisse der Optimierungen werden in Kapitel 5 gezeigt und bewertet. Zudem werden Rückschlüsse auf den Verlauf der Optimierungen gezogen. Anschließend wird die vorgestellte Methodik evaluiert, bevor in Kapitel 7 Rückschlüsse gezogen werden und die Arbeit nochmals zusammengefasst wird. Kapitel 8 gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten und Empfehlungen.

2 Grundlagen und Stand des Wissens

In diesem Kapitel soll eine Übersicht über die Grundlagen und den Stand des Wissens in relevanten Gebieten gegeben werden. Wo es zutrifft, werden die Wissenslücken aufgezeigt. Die behandelten Gebiete sind: Fahrzeugklimatisierung, Klimakomfort, modellbasierte Applikation, Black-Box Modelle, statistische Versuchsplanung und numerische Optimierung. Aufgrund der Vielzahl der Themen, werden jeweils nur die notwendigen Konzepte kurz vorgestellt und Literaturquellen für weiterführende Informationen genannt. Darauf aufbauend beschreibt Kapitel 3 wie die Grundlagen in der entwickelten Methode angewandt werden.

2.1 Fahrzeugklimatisierung

Es existieren zahlreiche Konzeptvarianten zur Klimatisierung von Fahrzeugen. In diesem Kapitel wird eine Klimatisierung durch ein zentrales, luftseitig geregeltes Klimagerät vorgestellt. Diese Variante stellt den Stand der Technik dar und ist die am häufigsten verwendete Bauart. Insbesondere im Bereich der Teilsysteme gibt es weitere Unterarten. Auf die Besonderheiten der jeweiligen Konzepte wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Nähere Informationen zu den verschiedenen Ausführungsarten sind in [3] zu finden. Detaillierte Informationen zu den Klimatisierungssystemen einiger Fahrzeugmodelle sind unter anderem in [4] und [5] zu finden. Obwohl diese Beispiele bereits älter sind, hat sich an dem verwendeten Konzept wenig geändert. Lediglich im Bereich des Heiz- und Kältekreislaufs, haben sich durch die zunehmende Elektrifizierung der Antriebsstränge andere Konzepte etabliert.

2.1.1 Systembeschreibung

Die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums wird überwiegend durch das Ausströmen konditionierter Luft in den Fahrzeuginnenraum realisiert. Zusätzlich werden vereinzelt beheizte Oberflächen wie zum Beispiel beheizte oder belüftete Sitze oder beheizte Lenkräder genutzt. Diese zusätzlichen Maßnahmen werden punktuell verwendet, wo eine Klimatisierung über die Luft nur schwerlich zu realisieren ist oder die Insassen in direktem Kontakt zu den Oberflächen stehen. In der jüngeren Vergangenheit wurden verstärkt dezentrale Klimatisierungskonzepte für die Fahrzeugklimatisierung betrachtet. Bei diesen Konzepten übernehmen temperierte Flächen bzw. sehr lokal platzierte Luftausströmer einen größeren Anteil der Klimatisierungsaufgabe. Eine Konditionierung der Luft über ein zentrales Klimagerät findet nur in kleinem Umfang oder gar nicht statt. Beispiele für solche Untersuchungen sind z.B. [6–10]. Diese Klimatisierungsansätze werden wegen der potenziellen Vorteile im Hinblick auf den Energieverbrauch und die Reaktionszeit betrachtet.

Im gegenwärtig etablierten Stand der Technik wird die Hauptlast der Klimatisierung jedoch durch die konditionierte Luft aus einem zentralen Klimagerät erbracht. Diese Luft wird von einem luftseitig geregelten Klimagerät zur Verfügung gestellt und anschließend über ein Luftkanalnetz zu den Ausströmern an verschiedenen Positionen im Fahrzeug verteilt. Abbildung 2 zeigt ein Schema eines luftseitig geregelten

Klimagerätes. Bei dieser Bauart wird die Ausblastemperatur über das Mischverhältnis von warmer und kalter Luft geregelt. Durch ein Gebläse wird ein Luftstrom in das Gerät erzeugt. Während des Frischluftbetriebs wird die Luft dabei von außen angezogen und während des Umluftbetriebs wird die Luft aus dem Innenraum angezogen. Im Bereich der Luftansaugung wird die Luft üblicherweise durch verschiedene Filter gereinigt.

Danach wird die Luft durch einen Wärmetauscher heruntergekühlt und dabei entfeuchtet. Dieser Wärmetauscher ist üblicherweise zugleich der Verdampfer eines Kältekreislaufs. Nachdem die Luft heruntergekühlt wurde, wird der Luftstrom durch eine sogenannte Mischluftklappe in zwei Luftströme aufgeteilt. Ein Luftstrom wird durch einen zweiten Wärmetauscher, den Heizwärmetauscher (HWT) wieder erhitzt und strömt danach in die sogenannte Mischluftkammer. In manchen Fällen befindet sich stromabwärts des HWT ein elektrisches Heizelement, um die Aufheizung der Luft zu unterstützen. In der Mischluftkammer trifft der erwärmte Luftstrom auf den zweiten Luftstrom, der direkt in die Mischluftkammer geleitet wird und daher kühl dort ankommt. In der Mischluftkammer vermischen sich die beiden Luftströme wieder zu einem Luftstrom mit der gewünschten Temperatur. Über verschiedene Luftklappen wird die temperierte Luft auf die verschiedenen Luftkanäle verteilt und strömt durch diese Kanäle zu den Ausströmern und letztendlich in den Fahrzeuginnenraum.

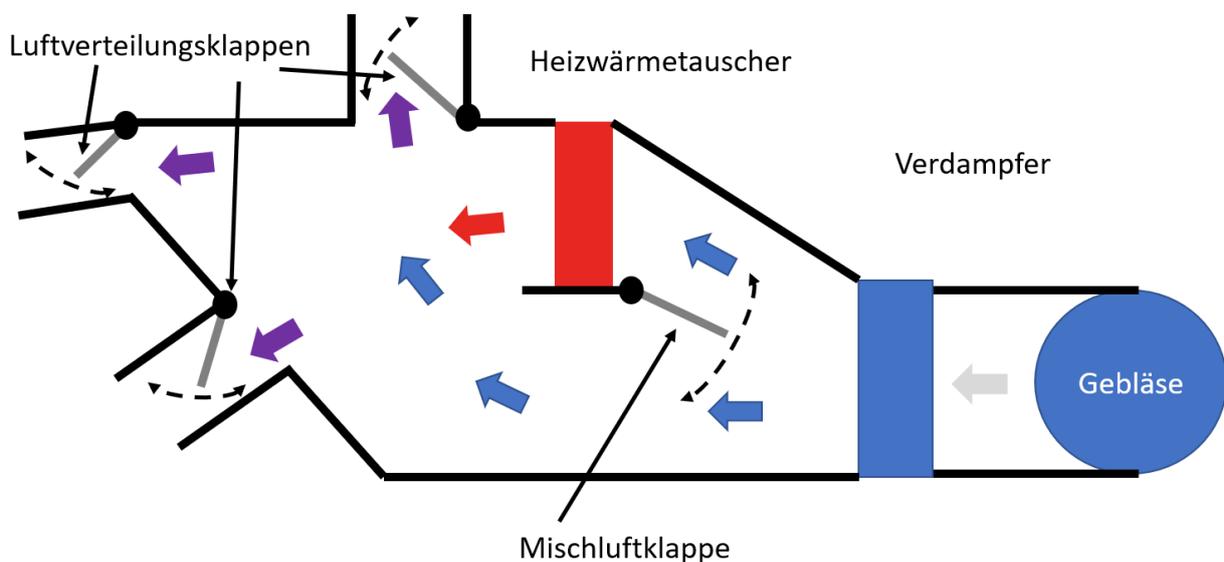


Abbildung 2. Schema eines luftseitig geregelten Heizklimagerätes

Durch herausfordernde Bauraumanforderungen ergeben sich in Klimageräten oftmals sehr komplexe Geometrien. Abbildung 3 zeigt einen Querschnitt durch das CAD Modell eines realen Heizklimagerätes. Die entsprechenden Elemente aus Abbildung 2 sind farblich hervorgehoben. Der Verdampfer ist blau umkreist, der Heizwärmetauscher rot. Die Luftverteilungsklappen sind weiß umkreist und die Mischluftklappen schwarz. Die Luftklappen der Fußkanäle sind in diesem Querschnitt nicht sichtbar. In diesem Fall sind die Mischluftklappen zweiteilig ausgelegt. Das bedeutet, dass jeweils zwei Klappen mechanisch miteinander verbunden sind und über einen Motor gesteuert werden. Das Gebläse und die sich anschließenden

Luftfilter sind in dieser Abbildung nicht sichtbar. Stromabwärts des HWTs befindet sich ein elektrischer Heizer. Dieser ermöglicht den Heizbetrieb, wenn nicht genügend warmes Wasser im HWT verfügbar ist.

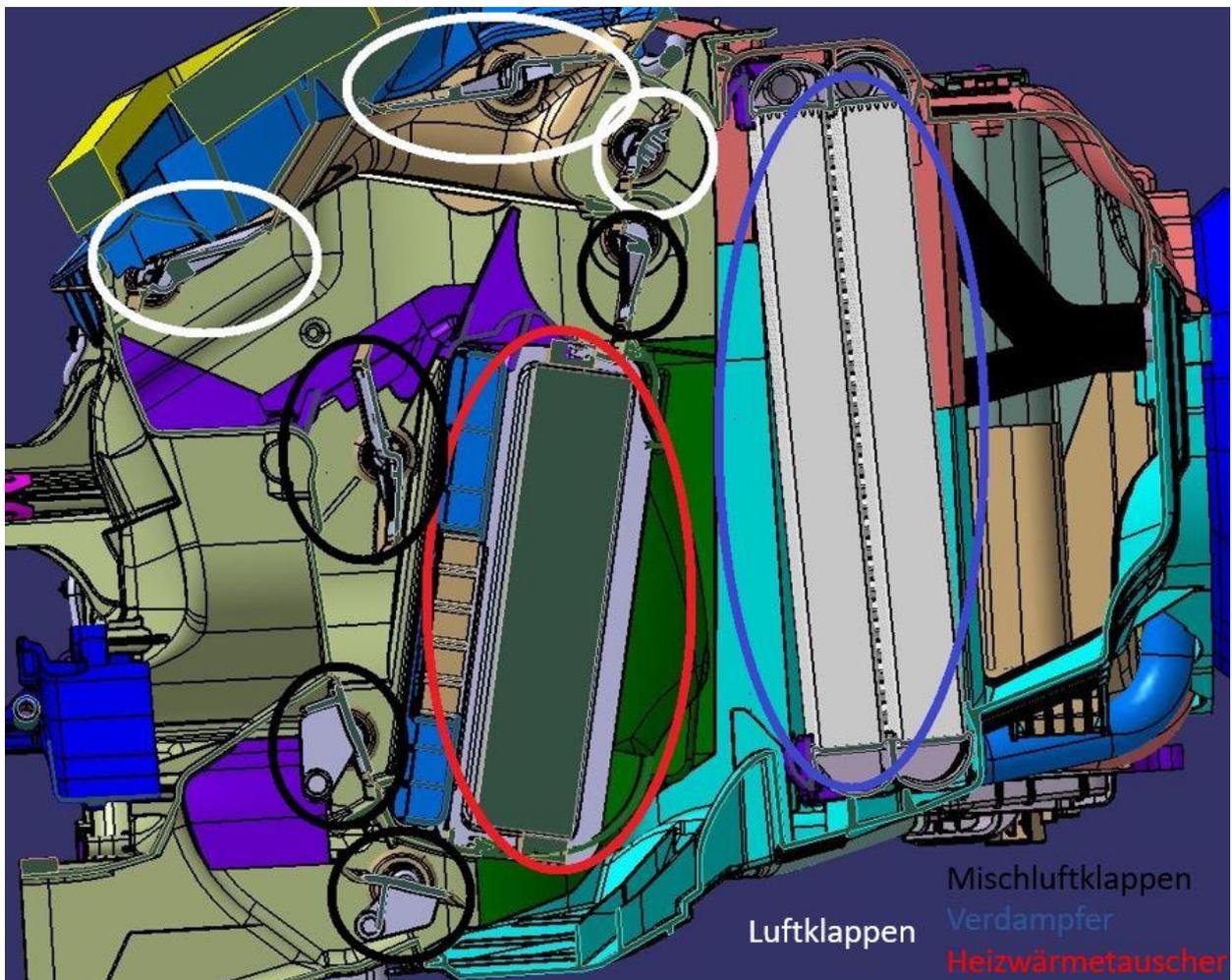


Abbildung 3. Querschnittsansicht eines Klimagerät CAD Modells

In dieser Ansicht erreicht die angesaugte Luft das Klimagerät von der rechten Seite und strömt durch den Verdampfer.

2.1.2 Teilsysteme

Zur Konditionierung der Luft benötigt das Klimagerät sowohl ein niedriges Temperaturreervoir am Verdampfer als auch ein hohes Temperaturreervoir am HWT. Diese Reservoirs werden durch einen Kälte- und Heizkreislauf realisiert. Diese beiden Kreisläufe werden im Folgenden näher beschrieben. Dabei wird auf die derzeit gängige Ausführungsart für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor eingegangen. Weiterführende Informationen zu verschiedenen alternativen Varianten sind unter anderem in [5] und [4] verfügbar.

2.1.2.1 Kältekreislauf

Der Kältekreislauf wird üblicherweise in der Form einer Kompressionskältemaschine ausgeführt. Abbildung 4 zeigt schematisch einen idealen Kaltdampfprozess. Der Kreislauf wird von einem Kompressor angetrieben. Dieser verdichtet und zirkuliert das überhitzte, gasförmige Kältemittel. Als Kältemittel wird üblicherweise R1234yf verwendet. Es finden ebenfalls Untersuchungen zur Verwendung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) als Kältemittel statt und es gab bereits vereinzelte Umsetzungen [11].

Durch die Verdichtung erhöht sich der Druck und die Temperatur des Kältemittels. Das Kältemittel strömt anschließend in einen Kondensator. Dieser ist üblicherweise an der Front des Fahrzeugs angebracht und wird vom Fahrtwind durchströmt. Vor dem Kondensator wird ein Lüfter angebracht, um den Luftdurchstrom bei geringen Geschwindigkeiten zu erhöhen und somit eine vollständige Verflüssigung des Kältemittels zu gewährleisten. An den Kondensator schließt sich ein Expansionsventil an. Durch die isenthalpe Expansion reduzieren sich der Druck und somit auch die Temperatur des Kältemittels.

Das gekühlte Kältemittel strömt anschließend in den Verdampfer. Dieser befindet sich im Klimagerät und wird von der Luft, die für den Innenraum bestimmt ist, umströmt. Durch den Wärmeübergang entzieht das Kältemittel Wärme aus der Luft und verdampft dabei. Anschließend wird das Kältemittel erneut im Kompressor verdichtet und der Kreislauf beginnt erneut.

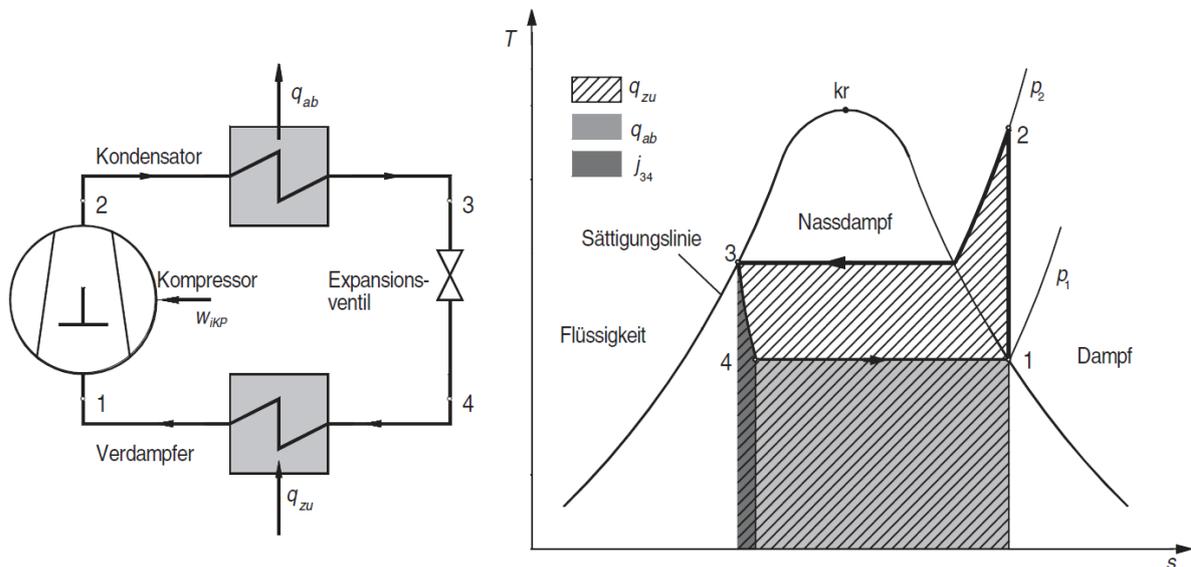


Abbildung 4. Schema eines idealen Kaltdampfprozesses und zugehöriges T-s Diagramm, aus [12]

Eine exemplarische Vorstellung eines realen Kältekreislaufs in einem Fahrzeug ist in der Arbeit von Strasser *et al.* [13] zu finden.

2.1.2.2 Heizkreislauf

Der Heizkreislauf speist sich aus dem Kühlkreislauf des Verbrennungsmotors. Das warme Wasser wird über ein Ventil vom Motorkühlkreis abgezweigt und fließt durch einen Wärmeübertrager. Dieser befindet

sich im Klimagerät und wird von der Luft des Klimageräts umströmt. Auf diese Weise wird die Luft geheizt und das Wasser gekühlt. Um den Wassermassenstrom zu erhöhen, kann gegebenenfalls eine Zusatzwasserpumpe im Heizkreislauf verwendet werden. Die Wassertemperatur ist von den Anforderungen der Motorkühlung abhängig. Gegebenenfalls können zusätzliche elektrische Durchlauferhitzer verwendet werden, um das Wasser zusätzlich aufzuheizen.

2.1.3 Regelung

Im etablierten Stand der Technik wird das Klimagerät von einem zentralen Klimaregler kontrolliert. Üblicherweise legt dieser Regler lediglich das Verhalten des Klimagerätes fest. Etwaige zusätzliche Flächenklimatisierungsmaßnahmen, wie z.B. eine Sitzheizung, werden von eigenständigen Reglern kontrolliert. Die gegenwärtig genutzte Regelungsmethode fällt in die Kategorie der Kennfeldregelung auch gain scheduling control genannt. Es handelt sich um eine komplexe Reglerkaskade in der auch eine Vielzahl an klassischen P- oder PI-Reglern eingebunden ist. Die Gebläsedrehzahlregelung sei als ein Beispiel genannt. Diese einfache PI-Regelung legt den Stromfluss zum Gebläse fest, sodass die vorgegebene Solldrehzahl eingehalten wird.

Ein Beispiel für einen Applikationsparameter ist die Kennlinie zur Korrektur des Sollwertes für die Innenraumtemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Diese Kennlinie ermöglicht es den langwelligen Strahlungseinfluss der Umschließungsflächen auf die Insassen ohne zusätzliche Sensoren zu berücksichtigen. Der ideale Verlauf ist dabei stark von den Dimensionen des Innenraums abhängig. Das Regelziel basiert auf den physikalischen Messungen von Sensoren. Diese werden jedoch korrigiert und modifiziert, bevor sie für die Regelung benutzt werden. Die Regelung selbst ist in der Form einer Klima Funktions Logik (KFL) implementiert. Dabei werden die benötigten Ausgangsgrößen in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen bestimmt. Die Zuordnung geschieht dabei mithilfe von Parametern, Kurven und Kennfeldern. Diese werden als Applikationsparameter bezeichnet und sind ein elementarer Bestandteil der Klimaregelung.

Die gegenwärtige Methode zur Bestimmung der Applikationsparameter der Klimaregelung ist mit großem Testaufwand verbunden und vertraut auf die Erfahrung von Applikationsingenieuren und deren individuellen Empfinden des Klimakomforts. Eine nachträgliche Anpassung der Abstimmung erfordert ebenfalls großen Aufwand. Daraus ergeben sich lange Entwicklungszeiten für die Klimatisierung eines Fahrzeugs und nur sehr eingeschränkte Reaktionsmöglichkeiten auf Kundenwünsche. Darüber hinaus sind die Möglichkeiten der Individualisierung des Klimas im Innenraum sehr begrenzt.

Trotz dieser Nachteile hat sich diese Art der Regelung als Standard in der Automobilindustrie durchgesetzt. Dies liegt an den Vorteilen der Methode. Durch die Abstrahierung der Regelung in die Applikationsparameter, lässt sich die Entwicklung der Regelung in verschiedene Module aufteilen. Dies passt gut zu der arbeitsteiligen Vorgehensweise der Industrie. Darüber hinaus lässt sich die Funktionslogik auf verschiedene Fahrzeuge übertragen. Dies ermöglicht eine einheitliche Funktion der Klimaregelung über die gesamte Modellpalette hinweg. Auch wenn dieses einheitliche Auftreten mit erheblichem

Applikationsaufwand verbunden ist. Durch die großen Stückzahlen ist dieser einmalige Aufwand jedoch zu rechtfertigen.

Neben der hier vorgestellten gain scheduling Regelung wurden auch andere Konzepte für die Klimaregelung betrachtet. Für die Klimaregelung im Gebäudebereich werden oftmals andere Regelungskonzepte untersucht [14, 15], da gain scheduling Regelungen dort nicht vorteilhaft sind und daher nicht sehr verbreitet sind. Auch im Automobilumfeld wurden alternative Regelungskonzepte wie Fuzzy Logiken oder modellprädiktive Regelungen untersucht. Oftmals beschränken sich diese Betrachtungen allerdings auf die Regelung des Kältekreislaufs [16, 17]. Vereinzelt wurden auch alternative Regelungskonzepte für die Regelung des gesamten Klimatisierungssystems veröffentlicht [18, 19]. Diese Alternativen haben sich in der Automobilindustrie jedoch noch nicht durchgesetzt.

Applikationsprozess

Der Ablauf des Applikationsprozesses für die Klimaregelung ist nicht standardisiert und unterscheidet sich von Fahrzeug zu Fahrzeug. Das Festlegen der einzelnen Parameter findet üblicherweise in einem iterativen Prozess statt. Dabei befinden sich ein oder mehrere Ingenieure im Fahrzeug und bewerten jeweils subjektiv die Qualität der derzeitigen Applikation. In einem nächsten Schritt werden mögliche Verbesserungen erarbeitet und die Auswirkungen dieser Änderungen wiederum im Fahrzeug bewertet. Dabei werden jeweils nur einzelne Parameter oder kleine Gruppen von Parametern verändert, um die Auswirkungen der Anpassungen besser abschätzen zu können. Die Reihenfolge, in der die Parameter verändert werden und die Anzahl der Parameter, die insgesamt angepasst werden müssen, unterscheiden sich von Fahrzeug zu Fahrzeug. Es ist nicht möglich allgemeine Aussagen darüber zu treffen. Diese Kriterien hängen unter anderem von der Terminplanung des Entwicklungsprozesses, der Bewertung und der Überschneidung zu eventuellen Vorgängerfahrzeugen, der Verfügbarkeit von Prototypfahrzeugen und Ingenieuren und Anforderungen an das Fahrzeugprojekt ab.

Der Applikationsprozess der Klimaregelung stellt einen wichtigen Teil der Entwicklungsarbeit dar. Neben der Klimaregelung werden auch zahlreiche andere Regelungen im Fahrzeug appliziert. Zum Beispiel die Motorenregelung, das Thermomanagement oder die Innenraumbeleuchtung. Kopp gibt einen umfassenden Einblick in die Applikation der Regelung von Dieselmotoren [20]. Der Applikationsprozess ist dabei ein zeitkritischer Prozess in der Fahrzeugentwicklung, da er erst nach Vorhandensein von Prototypen beginnen kann und mit großem Zeitaufwand verbunden ist. Für das Beispiel eines Dieselmotors ist die Einordnung des Applikationsprozess in den Gesamtentwicklungsprozess in Abbildung 5 dargestellt. Die Prozesse der Applikation sind dabei grau dargestellt. Für die Klimatisierung verschiebt sich diese Einordnung nach hinten, da mit der Basisapplikation erst begonnen werden kann, sobald Prototypenfahrzeuge zur Verfügung stehen.

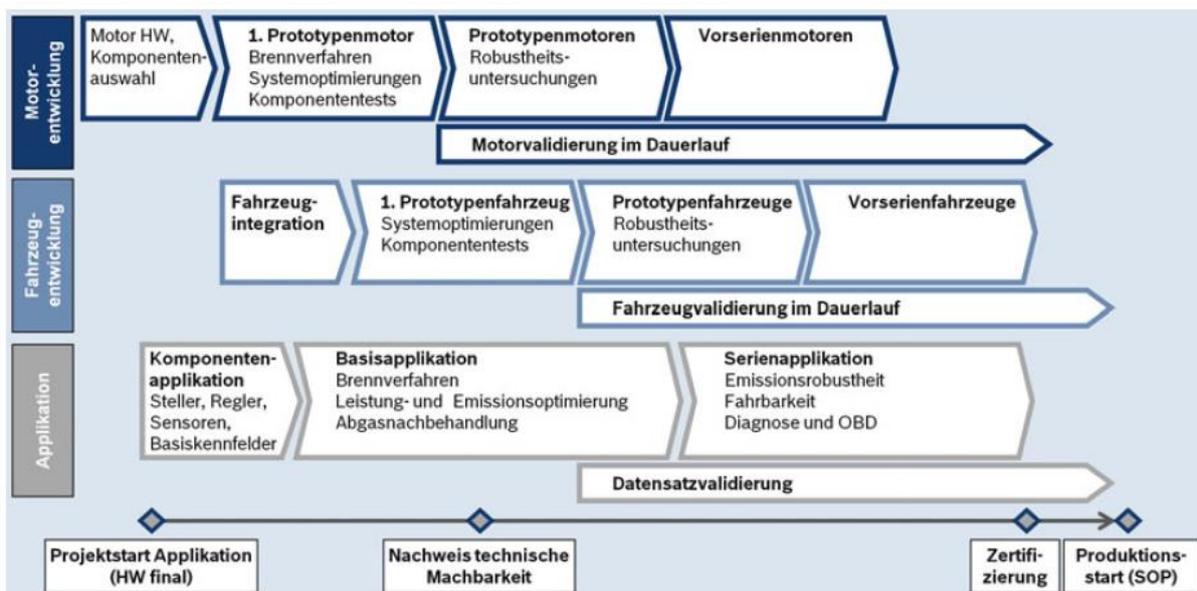


Abbildung 5. Einordnung der Applikation eines Dieselmotors in den Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs, aus [20]

2.2 Modellbasierte Applikation

Mit der zunehmenden Komplexität der Regelungen, Anforderungen und der Variantenvielfalt entwickelte sich die Applikation der zahlreichen Regler zu einem signifikanten Kosten- und Zeittreiber in der Fahrzeugentwicklung. Aus diesem Grund wurde zunehmend Forschung nach alternativen Methoden betrieben. In diesem Rahmen entstand die modellbasierte Applikation. Abbildung 6 zeigt vereinfacht die Unterschiede zwischen konventioneller und modellbasierter Applikation auf. Auf der linken Seite ist der konventionelle Prozess dargestellt und auf der rechten Seite die modellbasierte Variante.

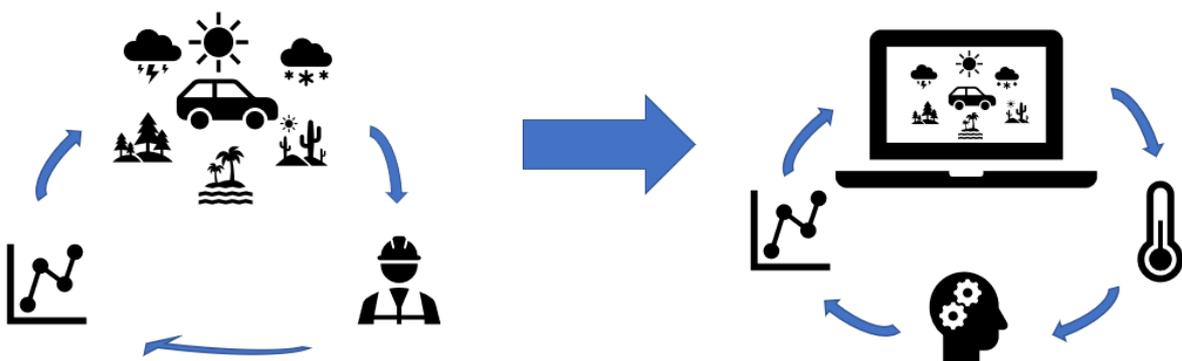


Abbildung 6. Übergang von konventioneller Applikation zu modellbasierter Applikation

Im konventionellen Applikationsprozess werden die Applikationsparameter durch Versuchingenieure festgelegt. Dazu werden die Parameter auf das Fahrzeug gespielt und im Fahrbetrieb unter wechselnden Randbedingungen getestet und bewertet. Aus den Beobachtungen und dem subjektiven Empfinden

werden mögliche Verbesserungen der Applikation abgeleitet und in der nächsten Iterationsschleife getestet. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis ein stabiler Stand der Applikation erreicht ist.

Bei der modellbasierten Applikation werden die Applikationsparameter anhand eines Modells des Fahrzeugs getestet. Dazu wird das Verhalten des Fahrzeugs mit den gewählten Applikationsparametern unter verschiedenen, exakt definierten Randbedingungen simuliert und aus den Ergebnissen eine objektive Zielgröße errechnet. Diese Zielgröße dient wiederum als Input für einen Optimierungsalgorithmus, der daraus die nächste Applikation bestimmt. In der nächsten Iteration wird diese Applikation wiederum in dem Modell getestet. Dies wiederholt sich bis ein vorab definiertes Konvergenzkriterium erfüllt ist.

Die modellbasierte Applikation wurde zunächst in der Motorregelung eingesetzt und gehört dort mittlerweile zum Stand der Technik [2] [21] [22]. Die Arbeit von Neßler [23] untersuchte verschiedene Möglichkeiten der Kennfelddarstellung. Castagne [24] und Tietze [25] beschäftigten sich ebenfalls mit der Fragestellung zur Applikation der Motorregelung und gingen dabei insbesondere auf verschiedene Möglichkeiten der Modellierung ein.

Inzwischen wird die modellbasierte Applikation auch für andere Regelungssysteme im Fahrzeug erforscht. Hoppe [26] untersuchte die Möglichkeit der Applikation von Diagnosefunktionen im Kühlkreislauf von Verbrennungsmotoren. Kahlbau [27] widmete seine Untersuchungen der Applikation des Schaltpunktes in Automatikgetrieben. Nippold [28] untersuchte die modellbasierte Applikation eines Lenksystems. Zur Aufzeichnung der erforderlichen Systemdaten wurde ein Hardware in the Loop (HIL) Teststand verwendet. Neben diesen Bemühungen gibt es auch laufende Untersuchungen zur Applikation des Bremssystems.

Allen gezeigten Ansätzen ist gemein, dass die verwendeten Modelle auf experimentell ermittelten Daten basieren. Für Simulationen im Anwendungsbereich sind hybride Modellierungsvarianten verbreitet. Dieser Modellierungsansatz kombiniert Black-Box Modelle mit physikalisch motivierten Modellen. Auf diese Weise kann die verwendete Hardware einfacher parametrisiert werden.

Für die Modellierung des Klimatisierungssystems hat Fritz [29] eine interessante Methode vorgestellt. Obwohl diese für den Entwicklungsprozess vorgesehen ist, und dort hauptsächlich den Energieverbrauch bestimmen soll, bietet sie auch das Potenzial in der modellbasierten Applikation verwendet zu werden. Das vorgestellte Modell basiert auf mehreren Bausteinen und vereint sowohl Black-Box Modelle in der Form von Kennfeldern als auch physikalisch motivierte Submodelle. Für das Gesamtmodell wurden die Bausteine Fahrprofil/Fahrzeugumgebung, Klimagerät, Innenraum, Regler, Motor und Kältekreislauf gewählt. Teilweise wurden die einzelnen Bausteine, insbesondere das Klimagerät, weiter aufgeteilt, um eine zielführende physikalische Modellierung zu ermöglichen. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an Submodellen.

Der Innenraum wurde als einzelnes Kontrollvolumen modelliert. Dieses steht im Austausch mit der Umgebung, dem Motor als zusätzliche Wärmequelle und dem Klimagerät. Es werden virtuelle Sensorgrößen für die Lufttemperatur, die Luftfeuchte und die CO₂ Konzentration berechnet. Außerdem wird die Scheibentemperatur bestimmt. Als Regler wurde eine einfache Betriebsstrategie verwendet, welche ausgehend von einer Hauptstellgröße die Mischluftklappenposition und die Gebläseleistung regelt. Das Gesamtmodell war in der Lage die Messdaten eines Straßenversuchs für die Innenraumtemperatur und weitere Größen mit hoher Genauigkeit zu reproduzieren.

Einen ähnlichen Ansatz haben Domschke und Matthes [30] vorgestellt. Auch hier wurden Anwendungsfälle für die Hardwareentwicklung bearbeitet und dazu eine Simulation des Klimatisierungssystems mit Regelung erarbeitet. Das Klimagerät wurde als 1-D Strömungsnetzwerk modelliert und für den Fahrzeuginnenraum wurde eine einfache Energiebilanz über ein einzelnes Volumen verwendet. Die Simulationsergebnisse wurden verwendet, um verschiedene Bauformen eines Klimagerätes zu vergleichen und bewerten zu können.

2.3 Thermischer Komfort

Das Sicherstellen thermischen Komforts im Fahrzeuginnenraum ist eine der wichtigsten Aufgaben des Klimatisierungssystems. Um diese Aufgabe erfüllen zu können, ist es wichtig den thermischen Komfort in einer objektiven und messbaren Größe auszudrücken. Insbesondere für Anwendungen im Gebäudebereich haben sich daher im Laufe der Zeit zahlreiche Forschungsvorhaben mit dieser Frage auseinandergesetzt. Angefangen mit den Untersuchungen von Fanger [31], dauern diese Forschungsbemühungen bis heute an. Grob lassen sich die erarbeiteten Modelle in zwei Klassen einteilen. Zum einen statistische Modelle, die lediglich auf Beobachtungen aus Probandenstudien beruhen und zum anderen Modelle mit einem physiologischen Modell als Grundlage. Beide Klassen werden im Folgenden vorgestellt und die wichtigsten Vertreter der Modellklassen genannt.

Bei einer Vielzahl der Modelle spielt die Äquivalenttemperatur T_{eq} eine wichtige Rolle. Die DIN EN ISO 14505-2 [32] definiert die Äquivalenttemperatur zu :

$$T_{eq} = T_s - \frac{Q}{h_{cal}} \quad (1)$$

Dabei ist:

T_s die Oberflächentemperatur

Q der unter den tatsächlichen Bedingungen gemessene Wärmeverlust durch Konvektion und Strahlung

h_{cal} der bei Kalibrierung in einer genormten Umgebung bestimmte kombinierte Wärmeübergangskoeffizient

Außerdem spielen in einigen Modellen die lokalen Hauttemperaturen bzw. die Änderungsrate dieser Temperaturen eine große Rolle.

2.3.1 Statistische Modelle

Bei den statistischen Modellen wurden die subjektiven Komfortaussagen von Probanden mit den jeweiligen Umgebungsbedingungen korreliert. Grundlage der Modelle war oftmals eine Überlegung zum Energieaustausch zwischen dem menschlichen Körper und der Umgebung. Daher wurden neben den Umgebungsbedingungen wie Äquivalenttemperatur, Operativtemperatur oder Ähnlichen oftmals auch der Bekleidungsgrad und Aktivitätsgrad der Person betrachtet. Da in diesen Modellen die komplexen Reaktionen durch relativ simple Korrelationen ausgedrückt werden, sind die Gültigkeiten der Modelle jeweils auf einen sehr engen Bereich begrenzt und können nur schwer auf andere Bereiche übertragen werden.

Das wohl bekannteste Modell zur Beschreibung des thermischen Komforts ist das Fanger Modell. Der darin definierte Predictive Mean Vote (PMV) gibt die durchschnittlich zu erwartende Bewertung des thermischen Komforts unter gegebenen Bedingungen an. Diese Aussage wird auf einer Skala von -3 (kalt) bis +3 (heiß) getroffen. Aufbauend auf dem PMV lässt sich ebenfalls der Anteil der Personen, die unter diesen Bedingungen Diskomfort verspüren, beschreiben. Diese Größe wird als Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) bezeichnet. Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang zwischen PMV und PPD. Es wird deutlich, dass es auch beim optimalen Wert des PMV von 0 einen kleinen Teil von etwa 5% gibt, der mit den Bedingungen nicht zufrieden ist. Bei Absolutwerten des PMV von größer 2, vergrößert sich der Anteil der Unzufriedenen auf mehr als 80%.

Das Modell zur Bestimmung des PMV wurde von Fanger im Jahr 1970 beschrieben [31] und in die DIN EN ISO 7730[33] und andere Normen übernommen. Das Modell basiert auf der Idee einer ausgeglichenen Energiebilanz zwischen dem Körper und der Umgebung. Der Gültigkeitsbereich des Modells beschränkt sich jedoch auf stationäre und homogene Umgebungsbedingungen. Darüber hinaus ist es nur für geringe Aktivitätslevel geeignet und ermöglicht keine Aussagen für Zustände außerhalb des komfortablen Bereichs.

Die Limitierung auf homogene Bedingungen schränkt den Nutzungsbereich des Modells stark ein, da homogene Bedingungen nur selten anzutreffen sind. Nilsson [34] entwickelte ein Modell, welches auch für inhomogene Bedingungen geeignet ist. Dieses Modell wurde ebenfalls in verschiedene Normen übernommen [32]. Der Ansatz ist ähnlich zu jenem von Fanger. Es wird jedoch zusätzlich auf das lokale Empfinden geachtet. Dazu wurde der Körper in 18 Zonen unterteilt.

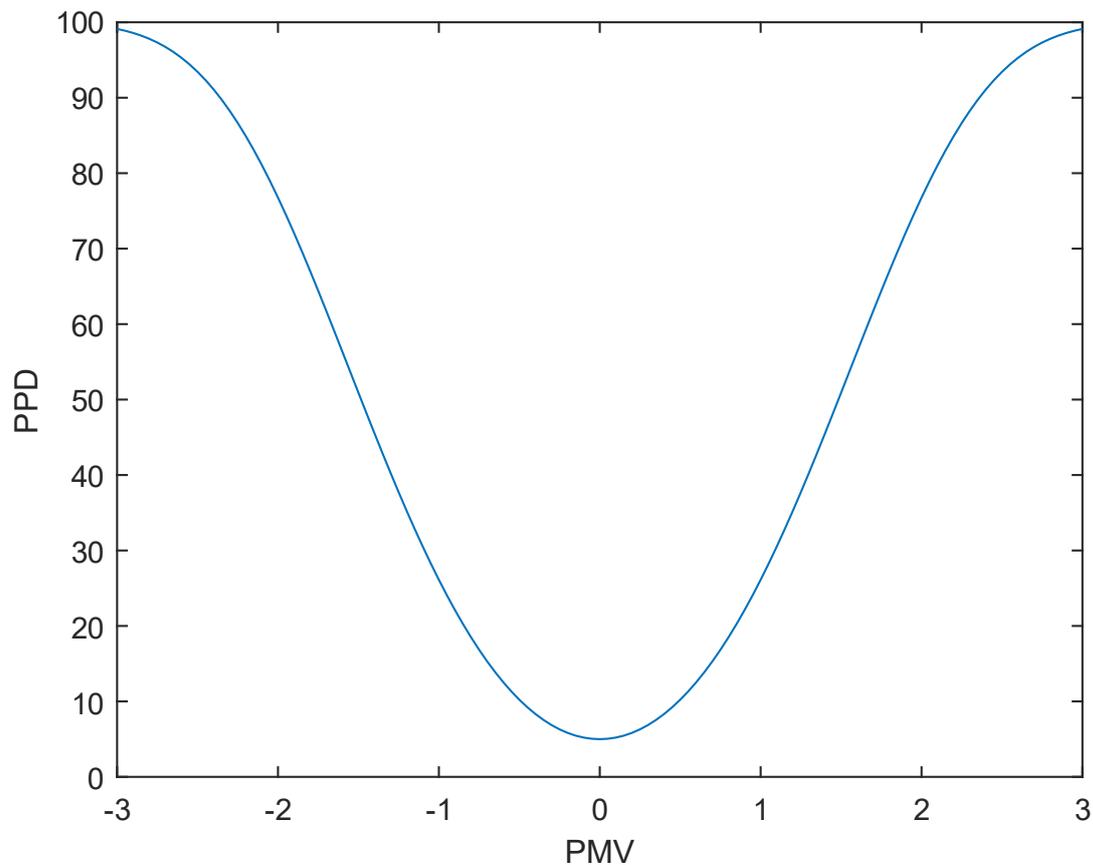


Abbildung 7. PPD Index als Funktion des PMV

Das Modell entstand aus umfangreichen Untersuchungen mit Messpuppen zur Bestimmung der Äquivalenttemperatur. Die zentrale Größe des Modells ist die lokale Äquivalenttemperatur. Zusätzlich wurden in umfangreichen Probandenuntersuchungen unterschiedliche Bedingungen hergestellt und analysiert. Die Äquivalenttemperatur wurde dabei mit Messpuppen gemessen und zugleich Aussagen der Probanden zum lokalen und globalen Temperaturempfinden aufgezeichnet. Aus den Aussagen wurden Komfortbänder für die einzelnen Körperzonen ermittelt. Das Gesamtempfinden wird mittels eines gewichteten Mittelwerts bestimmt.

Die Untersuchungen wurden sowohl mit sommerlicher als auch winterlicher Kleidung durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die resultierenden Komfortzonen für den Fall mit sommerlicher Bekleidung.

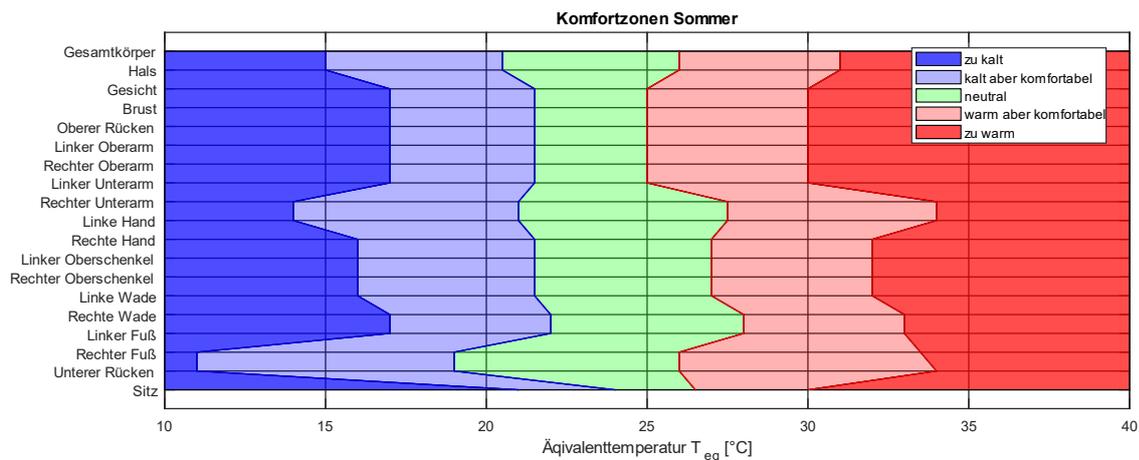


Abbildung 8. Sommer Komfortzonen nach Nilsson [34]

Dieses Modell ist wiederum nur für stationäre Umgebungsbedingungen mit geringer körperlicher Aktivität gültig. Außerdem sind die Komfortbänder lediglich für zwei spezifische Bekleidungsstypen definiert. Der Einfluss anderer Bekleidungsstypen kann nicht bestimmt werden.

2.3.2 Physiologische Modelle

Die zweite Klasse an Modellen basiert ebenfalls auf Probandenuntersuchungen. Allerdings werden bei diesen Modellen nicht Umgebungsgrößen, sondern körperspezifische Größen mit den Aussagen der Probanden korreliert. Zur Anwendung dieser Modelle ist es daher notwendig diese Körpereigenschaften bestimmen zu können. Dies macht die Verwendung von physiologischen Modellen notwendig. Diese Modelle simulieren die Reaktion des menschlichen Körpers auf verschiedene Außenbedingungen. Von dem Körperzustand, der sich einstellt, lässt sich dann wiederum auf den thermischen Komfort schließen.

Eines der ersten Modelle wurde von Stolwijk [35] entwickelt. In diesem Modell wird der Körper in sechs Segmente unterteilt. Jedes dieser Segmente besteht wiederum aus vier verschiedenen Schichten, die die verschiedenen Hautschichten repräsentieren sollen. Zusätzlich gibt es ein zentrales Blutvolumen. In dem Modell wird der Wärmeaustausch zwischen den einzelnen Segmenten sowie der Umgebung bestimmt. Zugleich ist auch ein regulierendes System integriert, sodass abhängig von der Hauttemperatur Zittern einsetzt oder die Schweißrate und damit der Wärmeübertrag von der Haut zur Umgebung erhöht werden kann. Dieses Modell bildet die Grundlage zahlreicher weiterer Modelle. Aussagen zum thermischen Empfinden sind mit diesem Modell jedoch nicht möglich.

Ein anderes bekanntes Modell ist das Fiala Modell [36]. Dieses Modell findet in einer großen Zahl an Simulationsprogrammen Verwendung. Es umfasst ein physiologisches Modell des Körpers. Bei diesem Modell wird der Körper in 15 Segmente unterteilt. Abhängig von der tatsächlichen Form des Segments, wird es ebenfalls in verschiedene Schichten unterteilt. Sowohl der Wärmeaustausch zwischen den verschiedenen Segmenten und Schichten als auch der Umgebung wird berücksichtigt. Die Reaktion des Körpers in der Form von Vasokonstriktion und Dilatation sowie Zittern und Schwitzen wird ebenfalls

berücksichtigt. Auf diese Weise kann die Hauttemperatur der verschiedenen Segmente im Verlauf der Zeit berechnet werden.

Auf Basis der errechneten Hauttemperaturen wurde ein zweites Modell entwickelt, das Aussagen über das thermische Empfinden liefert. Die Ergebnisse orientieren sich wiederum an einer Skala von -3 bis +3 und werden als Dynamic Thermal Sensation (DTS) bezeichnet. Der DTS wird sowohl für den gesamten Körper als auch für die einzelnen Segmente berechnet. Das Gesamtmaß wird aus den Werten für die einzelnen Segmente bestimmt. Die Werte der einzelnen Segmente hängen jeweils von der aktuellen Hauttemperatur sowie der Änderungsrate der Hauttemperatur ab.

Das Fiala Modell ermöglicht die Bestimmung des thermischen Empfindens in inhomogenen und instationären Umgebungsbedingungen. Die Gültigkeit ist jedoch auf komfortable Umgebungsbedingungen beschränkt. Ebenfalls ist der Einfluss der Bekleidung nicht abgedeckt, sodass die Gültigkeit auf die Referenzkleidung begrenzt ist. Situationen mit hoher körperlicher Aktivität sind ebenfalls nicht abgedeckt.

Neben diesen Modellen existieren zahlreiche weitere Modelle zur Beschreibung des thermischen Komforts. Eine umfassendere Übersicht wird in [37] gegeben.

2.3.3 Herstellerziele

Ein Großteil der in der Literatur beschriebenen Modelle bezieht die lang- und kurzwellige Strahlung in die Berechnung des thermischen Empfindens ein. Ungeachtet der wissenschaftlichen Erkenntnisse zum thermischen Komfortempfinden, werden in der Industrie vielfach Metriken auf Basis der Lufttemperatur verwendet. Aus Ermangelung an praxistauglicher Messtechnik geschieht dies trotz des Bewusstseins der Limitierungen dieser Metriken. Zur Messung der relevanten Lufttemperaturen werden dazu temporär Temperatursensoren an den spezifizierten Orten im Fahrzeug positioniert. Abbildung 9 zeigt eine Vorrichtung zur Messung der Lufttemperatur im Fußraum. Um den Einfluss von Fluktuationen zu verringern wird lediglich der Mittelwert der fünf Temperatursensoren aufgezeichnet.



Abbildung 9. Vorrichtung zur Messung der Lufttemperatur im Fußraum

2.4 Black-Box Modelle

Eine vielversprechende Möglichkeit zur Modellierung komplexer Sachverhalte stellen Black-Box Modelle dar. Durch ihre explizite und direkte Berechnungsform sind sie insbesondere für rechenintensive Aufgabenstellungen geeignet. Alternative Bezeichnungen für Black-Box Modelle sind: statistische Modelle, Metamodelle, surrogate Modelle oder auch datenbasierte Modelle.

Bei dieser Art der Modellierung wird eine vorab definierte Modellstruktur auf einen Datensatz von dem zu modellierenden System angewandt. Diesen Vorgang nennt man Training. Damit lassen sich Aussagen über die Zusammenhänge von Modellinputs und Modelloutputs treffen, ohne die physikalischen Zusammenhänge nachvollziehen zu müssen. Durch diese einfache Form der Darstellung, sind die Modelle meist sehr schnell zu berechnen.

Die Qualität der Modelle ist jedoch in hohem Maße von den verfügbaren Daten über das System abhängig. Die Generalisierbarkeit ist daher nur bedingt gegeben. Für jeden Anwendungsfall muss individuell entschieden werden, ob der Trainingsprozess erfolgreich war und ob die erzielte Genauigkeit ausreichend ist. Außerdem können bereits kleinste Veränderungen im System das Modell unbrauchbar machen. Um diese Veränderungen mithilfe des Modells darstellen zu können, ist ein komplettes Neutraining mit Daten des veränderten Systems notwendig.

Der Ablauf zur Erzeugung und Validierung eines Black-Box Modells wird in Abbildung 10 gezeigt. Der Prozess beginnt mit den Daten des Systems. Diese werden in ein Trainings- und ein Validierungsset aufgeteilt. Die Verteilung der Daten zwischen den beiden Sets ist dabei dem Anwender überlassen. Oftmals werden 10 bis 30 % des Datensatzes für das Validierungsset verwendet. Beide Sets bestehen jeweils aus korrespondierenden Paaren aus Input und Output. Die Inputs werden oftmals auch als Attribute oder Englisch, Features bezeichnet. Wie der Name bereits verrät, wird das Trainingsset zum Training des Modells verwendet. Das trainierte Modell wird anschließend verwendet, um Vorhersagen basierend auf den Inputs des Validierungssets zu treffen. Diese Vorhersagen werden mit den aufgezeichneten Outputs verglichen und aus den Abweichungen wird auf die Qualität des trainierten Modells geschlossen.

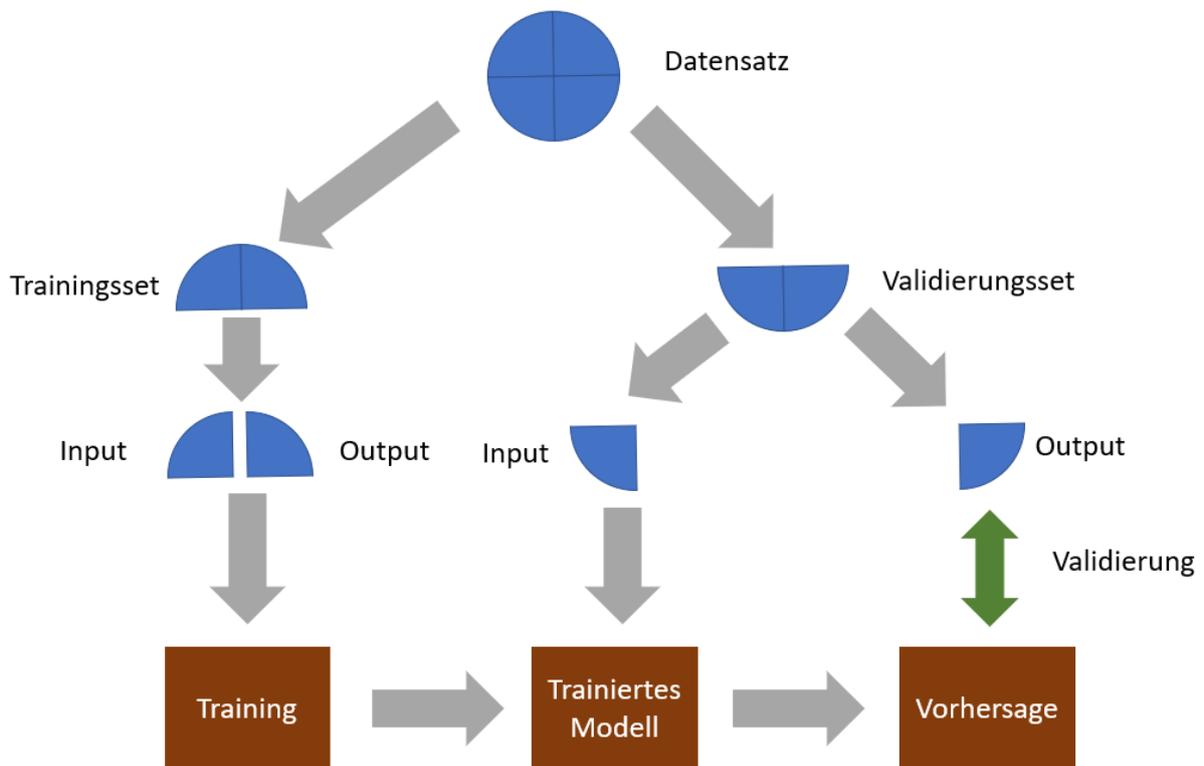


Abbildung 10. Schematische Darstellung der Qualitätsbestimmung von Black-Box Modellen

Zur Bewertung der Modellqualität existieren mehrere Metriken. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt. Zudem wurde im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Modellklassen entwickelt. Diese werden nachfolgend ebenfalls kurz beschrieben und die dahinterliegenden Konzepte werden vorgestellt.

2.4.1 Bewertungsmetriken für Black-Box Modelle

Es existieren verschiedene Möglichkeiten die Qualität eines Black-Box Modells zu bestimmen. Diese werden hier vorgestellt. Wie in Abbildung 10 gezeigt, wird üblicherweise der Output eines Modells für vorab definierte, dem Modell unbekannte Validierungspunkte, mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen.

Bei dieser Betrachtung ergibt sich für jeden der n Validierungspunkte eine Abweichung zwischen gemessenem Wert und der Ausgabe des Modells e_i . Diese Abweichung wird als Fehler, englisch Error, bezeichnet. Aus der Gesamtmenge dieser Abweichungen lässt sich der mittlere Fehler, englisch Mean Error (ME) zu

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (2)$$

berechnen. Mithilfe dieser Metrik lässt sich feststellen, ob systematische Fehler in dem Modell vorhanden sind. Der ME ist jedoch vorzeichenbehaftet und lässt daher keine Aussage über die Streuung der Fehler zu. Diese Aussage lässt sich durch den mittleren quadratischen Fehler treffen. Aus Konventionsgründen wird oftmals die Wurzel dieses Wertes verwendet. Diese Größe wird dann englisch Root Mean Squared Error (RMSE) genannt und ist wie folgt definiert:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}} \quad (3)$$

Eng mit dem RMSE verwandt ist die Varianz (Var) und damit auch die Standardabweichung, englisch Standard Deviation (SD) des Fehlers. Diese sind definiert als

$$Var = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - ME)^2}{n} \quad (4)$$

$$SD = \sqrt{Var} \quad (5)$$

Für Fälle ohne systematische Abweichung ist der $ME = 0$ und daher entspricht der RMSE in diesem Fall der Standardabweichung. Unter der Annahme, dass die Abweichung normalverteilt ist, können mithilfe der Standardabweichung Konfidenzintervalle definiert werden. Bei ausreichend großen Mengen an Validierungsdaten lässt sich mithilfe eines Histogramms ebenfalls überprüfen, ob die Annahme eines normalverteilten Fehlers gerechtfertigt ist.

2.4.2 Künstliche Neuronale Netze

Die wahrscheinlich am weitesten verbreitete Art der Black-Box Modelle stellen die künstlichen neuronalen Netzwerke (KNN) oder Englisch, artificial neural networks (ANN), dar. Diese Art der Black-Box Modelle ermöglicht mit ihren zahlreichen Ausprägungsformen einen Großteil der Anwendungen, die oftmals auch als künstliche Intelligenz bezeichnet werden.

Die Grundlage für KNNs wurde im Jahre 1943 durch Mc Culloch und Pitts [38] gelegt [39]. Seitdem gab es mit einigen Unterbrechungen eine stetige Weiterentwicklung der Idee und es wurden zahlreiche

Abwandlungen entwickelt, die eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten wie Bilderkennung, Klassifizierung oder Spracherkennung ermöglichen.

Für Regressionsprobleme ohne zeitlichen Bezug wird oftmals eine einfache Version eines KNNs verwendet, die sogenannten feedforward Netze oder auch Perzeptron. Dabei wird meistens eine relativ geringe Menge an Schichten verwendet. Am Beispiel eines einfachen feedforward Netzes wird das Funktionsprinzip der KNNs erklärt.

Wie der Name bereits verrät, beruht ein künstliches neuronales Netzwerk auf einem Netzwerk von künstlichen Neuronen. Ein künstliches Neuron besteht hauptsächlich aus einer Aktivierungsfunktion, die einen Input in einen Output überführt. Dieser Output ist wiederum das Ausgangssignal des Neurons. Der Input der Aktivierungsfunktion ist die gewichtete Summe beliebig vieler Eingangssignale. Die einzelnen Neuronen werden verbunden, indem das Ausgangssignal eines Neurons zu einem Eingangssignal eines anderen Neurons wird. Dies ist in Abbildung 11 schematisch dargestellt. Dort wird ein feedforward Netzwerk mit einer versteckten Schicht dargestellt. Die einzelnen Neuronen sind durch die Kreise dargestellt und in insgesamt drei Schichten angeordnet. Da es sich um ein feedforward Netzwerk handelt, gibt es lediglich Verbindungen von den Neuronen einer Schicht zu den Neuronen der darauffolgenden Schicht.

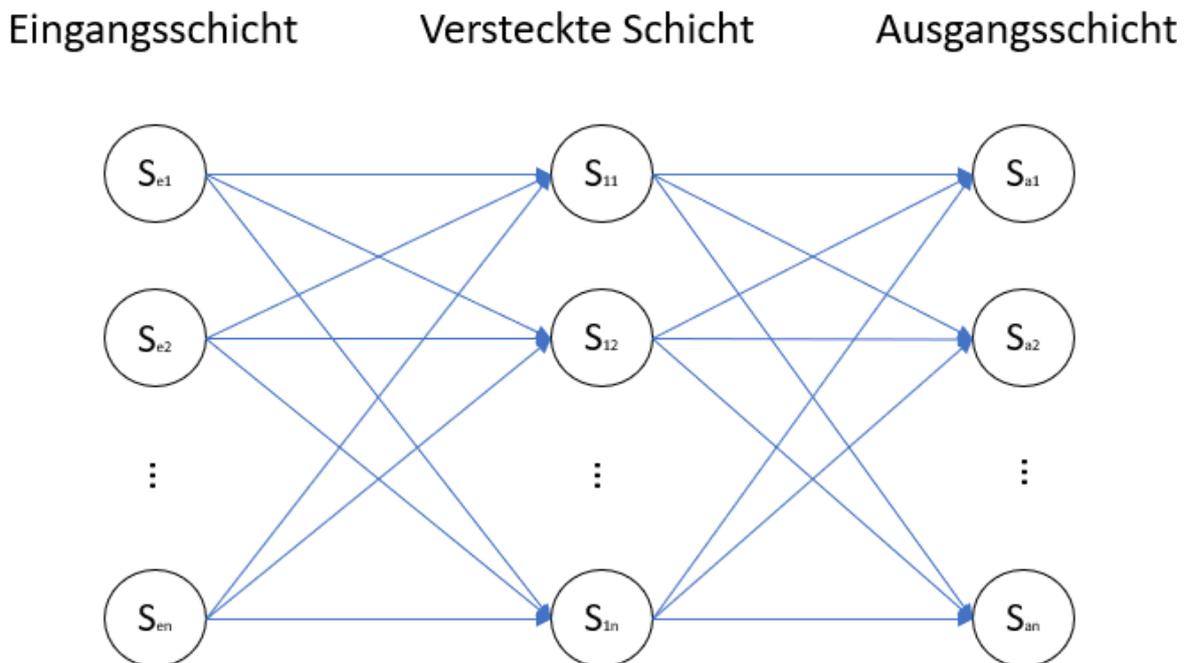


Abbildung 11. Schema eines feedforward Netzwerks mit einer versteckten Schicht

Als Aktivierungsfunktion wird oftmals die Sigmoid Funktion (6) verwendet. Andere Aktivierungsfunktionen sind jedoch ebenso möglich und Gegenstand aktiver Forschungsvorhaben.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (6)$$

Die Eigenschaften der Netzwerke können durch die Struktur des Netzwerkes und die Aktivierungsfunktion beeinflusst werden. Außerdem ist der Trainingsprozess des Netzwerkes von entscheidender Bedeutung. Beim Training werden die Eingangsgewichte der einzelnen Neuronen bestimmt, sodass die Ausgangssignale des Netzwerkes möglichst gut den gemessenen Ergebnissen entsprechen. Das Training geschieht in einem iterativen Prozess mithilfe von aufgezeichneten Trainingsdaten. Es existiert eine Vielzahl von Trainingsalgorithmen. Die Auswahl des Trainingsalgorithmus hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der trainierten Modelle, die Rechenzeit für das Training und die Anforderungen an die Trainingsdaten.

2.4.3 Gauß Prozess Regression

Ein anderes Verfahren, das zur Lösung von Regressionsproblemen verwendet werden kann, ist die Gauß Prozess Regression. Diese ist für zweidimensionale Probleme auch als Kriging bekannt und wurde durch Krige im Jahre 1951 entwickelt [40]. Ursprünglich war der Anwendungsbereich auf zweidimensionale Probleme der Geostatistik begrenzt. 1963 wurde die Grundlage für N dimensionale Regressionsprobleme gelegt.

Bei dieser Methode wird ein Gauß Prozess genutzt, um das Regressionsproblem zu lösen. Dieser Gaußprozess ist durch eine Erwartungswertfunktion und eine Kovarianzfunktion definiert. Während die Erwartungswertfunktion oftmals in der Form von einfachen Polynomen angenommen wird, wird für die Kovarianzfunktion üblicherweise eine komplizierte Form mit zahlreichen Parametern angenommen.

Während des Trainings der Modelle werden wiederum die wenigen Parameter der Erwartungswertfunktion und die vielen Parameter der Kovarianzfunktion festgelegt, um die Kovarianz der Trainingsdaten möglichst gut abbilden zu können. Damit ist der Gauß Prozess definiert und es lassen sich in der Umgebung bekannter Stützpunkte sowohl die wahrscheinlichste Lösungsfunktion als auch die Konfidenzbereiche dieser Interpolation bestimmen. Nähere Informationen über die möglichen Formen der Kovarianzfunktionen und der verschiedenen Trainingsmöglichkeiten können dem vielbeachteten Werk von Rasmussen und Williams [41] entnommen werden.

2.4.4 Entscheidungswälder

Eine andere Klasse sind die sogenannten Entscheidungswälder. Dabei handelt es sich um eine Ensemble Technik, bei der eine Vielzahl von unterschiedlichen Algorithmen kombiniert wird. In diesem Fall gehören diese Algorithmen zur Klasse der Entscheidungsbäume.

Ein Entscheidungsbaum besteht aus mehreren Knoten, die in Entscheidungsebenen angeordnet sind. In jedem Knoten wird ein Kriterium überprüft und abhängig vom Ergebnis der Prüfung wird einer der Ausgänge genommen, um auf die nächste Entscheidungsebene zu kommen. In der klassischen binären Form hat ein Knoten jeweils zwei Ausgänge. Es existieren jedoch auch Strukturen mit einer abweichenden

Anzahl an Ausgängen je Knoten. In Abbildung 12 wird ein binärer Entscheidungsbaum mit vier Ebenen gezeigt, um das Prinzip zu verdeutlichen.

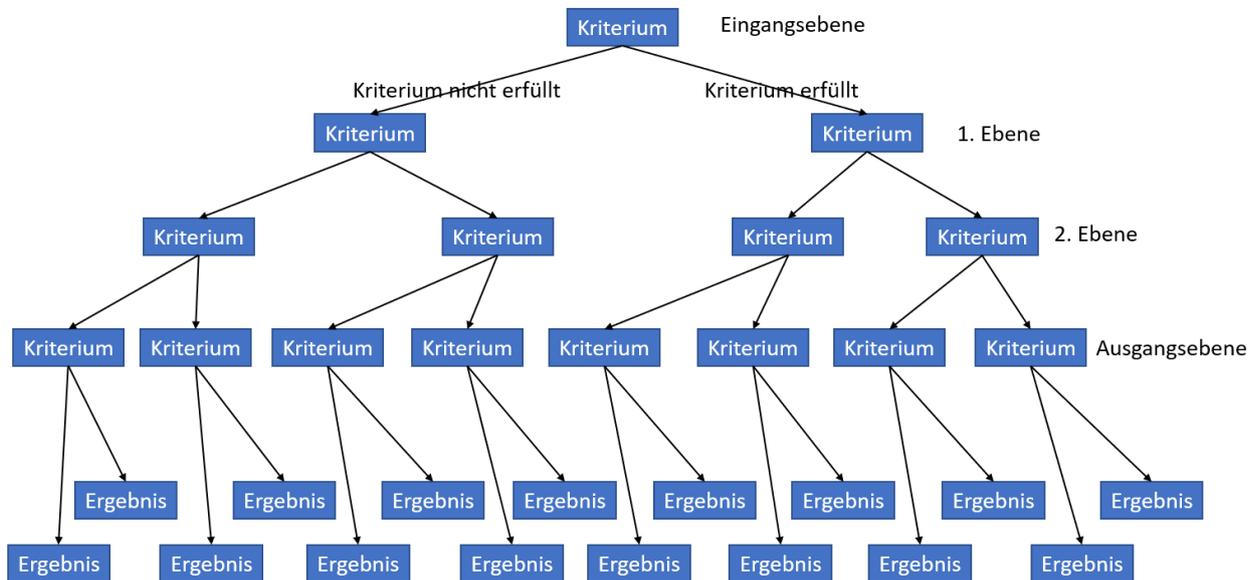


Abbildung 12. Ein binärer Entscheidungsbaum mit vier Ebenen

Beim Training der Entscheidungsbäume werden jeweils die Kriterien der einzelnen Bäume bestimmt. Es existieren zahlreiche Trainingsalgorithmen, um diese Bedingungen festzulegen. Weitere Details können klassischen Lehrbüchern wie dem von Dahan *et al.* [42] entnommen werden.

Bei einem Entscheidungswald werden statt eines großen Entscheidungsbaumes die Aussagen mehrerer Entscheidungsbäume kombiniert und daraus eine Aussage getroffen. Um die einzelnen Entscheidungsbäume zu trainieren, werden jeweils unterschiedliche Subsets der Trainingsdaten verwendet. Auch hier gibt es unterschiedliche Möglichkeiten die Aussagen der einzelnen Bäume zu verwenden. Unter anderem werden Bagging und Boosting oftmals verwendet. Siehe [43] für nähere Informationen zu den einzelnen Techniken.

2.4.5 Andere Klassen

Neben den hier aufgezählten Ansätzen gibt es noch zahlreiche andere. Diese werden jedoch in der Literatur weniger intensiv betrachtet und wurden auch in dieser Arbeit nicht verwendet. Nennenswerte Klassen sind die Support Vektor Maschinen oder k- nearest neighbour Algorithmen. Eine umfassendere Übersicht mit den dahinterstehenden Prinzipien wird von Richter [44] gegeben.

2.4.6 Dimensionsreduktion

Eine weitverbreitete Methode zur Modifikation von Black-Box Modellen ist die sogenannte Dimensionsreduktion. Dabei werden unnötige Dimensionen aus den Trainingsdaten entfernt. Auf diese Weise kann oftmals die Trainingszeit verringert und die Modellgenauigkeit verbessert werden. Zur

Identifizierung der zu entfernenden Dimensionen gibt es drei verschiedene Ansätze. Den Filteransatz, den Wrapper Ansatz und den Embedded Ansatz. In jedem dieser Ansätze können verschiedene Algorithmen verwendet werden, um geeignete Kandidaten zu finden. Übersichten über die verschiedenen Techniken werden jeweils von Lee und Verleysen [45] und Cunningham [46] gegeben.

Beim Filteransatz wird die Auswahl der zu verwendenden Dimensionsreduktion allein auf der Basis einer oder mehrerer Algorithmen getroffen. Dieser Ansatz ist daher universell anwendbar und einfach umsetzbar. Jedoch werden die Eigenschaften der daraufhin verwendeten Black-Box Modelle nicht berücksichtigt. Eine Rückkopplung zwischen Modell Performance und Dimensionsreduktion findet nicht statt.

Beim Wrapper Ansatz ist diese Rückkopplung gegeben. Die Black-Box Modelle werden mit verschiedenen Dimensionsreduktionskandidaten trainiert und die Qualität der trainierten Modelle bestimmt. Die Auswahl des besten Kandidaten wird auf Basis der erreichten Modellqualität getroffen. Durch dieses Vorgehen können bessere Ergebnisse erzielt werden, da die Eigenschaften der Black-Box Modelle ebenfalls berücksichtigt werden. Der Aufwand zur Bestimmung der Lösung kann durch das notwendige Training der Modelle jedoch sehr groß werden.

Als Embedded Ansatz bezeichnet man Techniken, bei der eine Dimensionsreduktion bereits in die Trainingsroutine der Black-Box Modelle integriert ist.

2.5 Statistische Versuchsplanung

Zur Erzeugung hochwertiger Daten wird ein guter Versuchsplan benötigt. Zur Erzeugung dieser Versuchspläne existieren Techniken der statistischen Versuchsplanung, englisch Design of Experiments, (DOE). Die unterschiedlichen Methoden werden üblicherweise in Klassen eingeteilt.

Die Probleme der modellbasierten Applikation sind üblicherweise durch eine hohe Anzahl an Dimensionen und möglichen Werten innerhalb der Dimensionen gekennzeichnet. Außerdem ist das Systemverhalten im Vorhinein nicht bekannt und nicht durch einfache (lineare oder quadratische) Zusammenhänge zu approximieren. Mit diesen Voraussetzungen verspricht die Klasse der raumfüllenden Versuchsdesigns die besten Ergebnisse. In diese Klasse fallen insbesondere die Techniken der Lateinischen Quadrate und quasi zufälliger Folgen. Zur Bewertung eines Versuchsplans bestehen ebenfalls verschiedene Methoden. Diese werden zusammen mit den Methoden zur Erzeugung raumfüllender Versuchspläne im Folgenden vorgestellt.

Die vorgestellten Techniken erzeugen den Versuchsplan ohne vorheriges Wissen über das zu untersuchende System. Daraus ergeben sich universelle Versuchspläne, die jedoch nicht optimal auf das zu untersuchende System angepasst sind. In der jüngeren Vergangenheit wurden vermehrt Techniken der Versuchsplanung erstellt, die Wissen über das Systemverhalten einbeziehen, um den Versuchsplan für

den maximalen Erkenntnisgewinn anzupassen. Diese Methoden verlangen jedoch nach Kenntnissen über das System vor Versuchsbeginn. Andere adaptive Techniken passen den Versuchsplan während der Versuchsdurchführung kontinuierlich an. Auf diese Techniken wird im Folgenden nicht weiter eingegangen. Eine Übersicht über diese Möglichkeiten ist in Garud *et al.* [47] zu finden. Die folgende Übersicht beschränkt sich auf die einfacheren, systemfreien Methoden, die sich noch immer großer Beliebtheit erfreuen.

2.5.1 Quasi zufällige Folgen

Eine Möglichkeit zur Erzeugung raumfüllender Versuchsdesigns stellen quasi zufällige Folgen wie die Halton oder die Sobol Folge dar. Die Sobol Folge wurde 1967 von Sobol veröffentlicht [48]. Die Halton Folge wurde 1964 von Halton veröffentlicht [49]. Beide Folgen sind Beispiele für Niederdiskrepanz Folgen. Diese Folgen zeichnen sich durch eine gleichmäßige Verteilung der Zahlen aus. Dies ermöglicht eine gute raumfüllende Wirkung.

Durch die Auswahl der Startwerte sowie der Basis und gegebenenfalls der Auslassintervallen lassen sich die Folgen jeweils auf den gewünschten Anwendungsfall anpassen. Weitere Modifikationen der Folgen sind jedoch nicht möglich. Insbesondere die Sobol Folge wird oftmals bei der Versuchsplanerzeugung für unterschiedlichste Monte Carlo Experimente verwendet.

2.5.2 Lateinische Quadrate

Lateinische Quadrate sind durch ihr Vorkommen im Sudoku Spiel sehr bekannt. Ein lateinisches Quadrat der Ordnung n besteht aus n Spalten und n Zeilen. Damit das Quadrat die Bedingungen für ein lateinisches Quadrat erfüllt, muss in jeder Zeile und in jeder Spalte das Merkmal genau einmal vorkommen. Dieses Prinzip lässt sich auch auf Räume in höheren Dimensionen erweitern.

Die entstehenden lateinischen Hyperwürfel können zur Erzeugung raumfüllender Versuchspläne verwendet werden. Dazu werden die einzelnen, kontinuierlichen Variablen in n Segmente aufgeteilt und ein lateinischer Hyperwürfel erzeugt. In jedem der ausgewählten Segmente wird dann zufällig ein Messpunkt platziert

Durch Einhaltung der Anforderungen für ein lateinisches Quadrat wird automatisch eine Clusterung verhindert und auch das wiederholte Vorkommen von Messpunkten ist ausgeschlossen. Zugleich ergibt sich jedoch, dass die Randpunkte des Versuchsraums oftmals unterrepräsentiert sind.

2.5.3 Bewertungskriterien

Die Frage nach dem besten Versuchsplan ist schwierig zu beantworten. Es existieren einige Kriterien um die Qualität eines raumfüllenden Versuchsplanes zu beschreiben. Zwischen den Ergebnissen der Kriterien gibt es jedoch Unterschiede, sodass die Frage nach dem besten Ergebnis nicht eindeutig geklärt werden kann. Grob lassen sich die Kriterien in distanzbasierte und diskrepanzbasierte Metriken unterteilen.

Ein distanzbasiertes Kriterium ist das Maximin Kriterium. Dieses beruht auf der euklidischen Distanz der einzelnen Stichproben im Versuchsraum. Das Maximin Kriterium gibt den kleinsten Abstand zwischen zwei Punkten an und sollte so groß wie möglich sein. Wenn alle Punkte des Versuchsplans maximal voneinander entfernt sind, ergibt sich eine gleichmäßige Verteilung.

Zur Bestimmung der Diskrepanz eines Punktes z wird ein Subraum $[0, z)$ gebildet. $N(T, [0, z))$ gibt die Anzahl der Versuchspunkte, die sich in diesem Subraum befinden, an. Die Diskrepanz eines Punktes z im Versuchsplan ist definiert als

$$Diskrepanz(z) = \left| \frac{N(T, [0, z))}{n_r} - \frac{Vol([0, z))}{1} \right| \quad (7)$$

Die Diskrepanz gibt den Unterschied des Verhältnisses von umschlossenen Punkten $N(T, [0, z))$ zu allen Punkten n_r im Versuchsplan und dem Verhältnis des Volumens des Subraums $Vol([0, z))$ zum Volumen des gesamten Versuchsraum wieder. Durch Normalisierung ist das Volumen des gesamten Versuchsraumes per Definition 1. Aufbauend auf der Definition der Diskrepanz eines einzelnen Punktes existieren verschiedene Metriken, um die Güte eines Versuchsplanes zu beschreiben. Einige davon sind in [50] beschrieben. Ziel ist jeweils eine möglichst gleichmäßige und geringe Diskrepanz der einzelnen Punkte.

2.6 Numerische Optimierungsmethoden

In vielen Anwendungsfällen besteht der Bedarf für Optimierungen. Daher wurden bereits früh Lösungsmöglichkeiten für Optimierungsprobleme entwickelt. Im mathematischen Sinn ist ein Optimierungsproblem als Suche nach dem minimalen Wert einer Funktion definiert.

In der Umsetzung geht es darum die Parameter einer Zielfunktion so zu wählen, dass die Zielfunktion ihr Minimum erreicht. Die Anzahl der Parameter kann beliebig hoch sein und der Verlauf der Zielfunktion beliebig komplex. Daher ist eine eindeutige Herleitung der Lösung in der Praxis oftmals nicht möglich und es muss auf numerische Algorithmen zurückgegriffen werden, die eine Näherungslösung erzeugen. Ein häufig auftretendes Problem ist, dass statt des globalen Minimums ein lokales Minimum gefunden wird. Der Unterschied zwischen lokalen und globalen Minima ist in Abbildung 13 dargestellt.

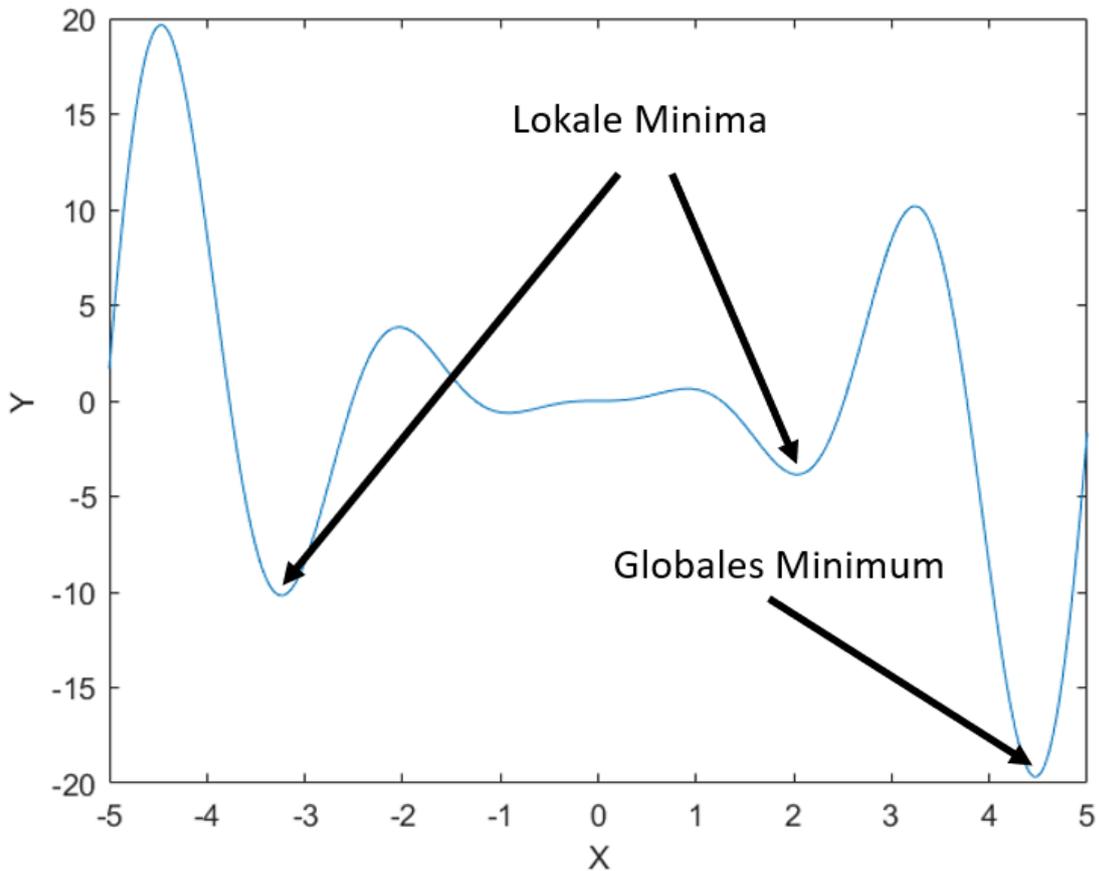


Abbildung 13. Unterscheidung von lokalen und globalen Minima

Es existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Optimierungsalgorithmen. Diese lassen sich auf Basis der zugrundeliegenden Idee grob in Klassen unterteilen. Nach dem „No Free Lunch Theorem“ [51] gibt es jedoch keinen Optimierungsalgorithmus der über alle Optimierungsprobleme hinweg besser abschneidet als ein anderer. Daher muss für jedes Problem individuell betrachtet werden, welche Methode die besten Ergebnisse verspricht.

Es ist ebenfalls möglich verschiedene Optimierungsalgorithmen zu kombinieren, indem zum Beispiel zunächst eine explorative Optimierung durchgeführt wird. Dabei wird zunächst der Suchbereich für die Lösung eingegrenzt und das Ergebnis der ersten Optimierung wird als Startpunkt einer zweiten Optimierung genutzt. Zwei wichtige Algorithmeklassen werden im Folgenden kurz vorgestellt. Diese sind gradientenbasierte und evolutionäre Algorithmen. Eine weiterführende Einführung in die Materie und insbesondere gradientenbasierte Algorithmen wird von Stein [52] besprochen. Kacprzyk und Schaefer [53] zeigen die Grundlagen der evolutionären Algorithmen auf.

2.6.1 Gradientenbasierte Algorithmen

Eine weitverbreitete Klasse der Optimierungsalgorithmen sind die gradientenbasierten Verfahren auch als Gradientenabstiegsverfahren, Abstiegsverfahren oder Bergsteigeralgorithmus bekannt. Die grundlegende

Idee ist es ausgehend von einem definierten Punkt jeweils die lokalen Gradienten der Zielfunktion zu bestimmen. Der Iterationsschritt wird dann in die Richtung des stärksten negativen Gradienten gegangen. Am neuen Punkt werden wiederum die lokalen Gradienten bestimmt und der Algorithmus wiederholt sich bis eine geeignete Lösung gefunden wurde.

Diese Klasse der Optimierer ist effizient und genau. Insbesondere, wenn die Gradienten der Zielfunktion direkt bestimmt werden können. Oftmals können die Gradienten der Zielfunktion jedoch nicht direkt bestimmt werden. Daher müssen diese Werte durch numerische Methoden approximiert werden. Dies führt zum Bedarf für zusätzliche Funktionsevaluierungen.

Die Methode ist typischerweise nicht sehr robust. Das Risiko, dass ein lokales statt des globalen Minimums gefunden wird, ist abhängig von der Zielfunktion hoch. Durch das mehrmalige Ausführen des Algorithmus mit unterschiedlichen Startpunkten kann dieses Problem umgangen werden. Dies geht jedoch zu Lasten der Effizienz.

Ein besonders bekannter Vertreter dieser Kategorie ist Sequential Quadratic Programming (SQP). Dieses Verfahren wird in zahlreichen Lehrbüchern zum Thema beschrieben. Jarre [54] sei als ein Beispiel genannt.

2.6.2 Evolutionäre Algorithmen

Eine andere Klasse der Optimierungsalgorithmen ist die Klasse der evolutionären Algorithmen. Bei diesen wird für eine sogenannte Population von Parametern der Wert der Zielfunktion bestimmt. Danach werden die jeweils besten Individuen dieser Population bestimmt (Selektion). Diese Auswahl der besten Individuen einer Population wird als Elite bezeichnet. Aus diesen besten Individuen wird wiederum durch Kombination (Rekombination) und zufällige Veränderungen (Mutation) die nächste Generation gebildet. Um eine Verschlechterung bereits erreichter Ergebnisse zu vermeiden, werden die Eliten selbst jeweils auch mit in die nächste Generation übernommen. Dieser Ablauf wiederholt sich bis eine Lösung gefunden wird.

Dieser Algorithmus ist weniger zielgerichtet als Gradientenabstiegsverfahren. Allerdings ist das Risiko in einem lokalen Minimum zu enden geringer, da zahlreiche Startpunkte existieren und es immer wieder zu zufälligen Mutationen kommt, die ein lokales Minimum überwinden können. Durch die einfache Implementierung und die Robustheit wird dieses Verfahren in einer Vielzahl von Anwendungen benutzt. [55, 56]

2.6.3 Andere Algorithmen

Neben diesen beiden Klassen an Optimierungsalgorithmen gibt es noch eine Vielzahl an weiteren Algorithmen. Diese basieren auf Analogien zu natürlich auftretenden Phänomenen und stellen oftmals eine Kombination aus zufälligen Elementen und gradientenbasierten Elementen dar. Bekannte Beispiele sind:

Partikel Schwarm [57]

Simulierte Abkühlung [58]

Ameisen Kolonie [59]

Sintflut [60]

Es existieren zahlreiche Anwendungsfälle der verschiedenen Algorithmen. Eine aktuelle Auswahl wird unter anderem in Dutta und Mahanty [61] präsentiert.

3 Methode

In diesem Kapitel wird die verwendete Methode vorgestellt. Da die zu entwickelnde Methodik exemplarisch an einem Fahrzeugtyp angewandt wird und entsprechend auf die speziellen Eigenschaften dieses Fahrzeugtyps angepasst werden muss, wird zunächst das verwendete Versuchsfahrzeug vorgestellt. Zudem wird der Modellierungsansatz mit den verwendeten Modulen für Regler, Klimagerät und Innenraum beschrieben. Danach werden die verwendete Zielfunktion und die zugrunde liegende Methodik der Optimierung vorgestellt und begründet. Abschließend wird die Applikationsumgebung, die zur Durchführung der unterschiedlichen Berechnungen entwickelt wurde, vorgestellt.

Als Beweis der Machbarkeit wird die modellbasierte Applikation exemplarisch für ein Fahrzeug erprobt. Aus Verfügbarkeitsgründen wurde dazu ein BMW 6er GT, Modelljahr 2017, mit 2,5 Zonen Klimaautomatik ausgewählt. Abbildung 14 zeigt das Versuchsfahrzeug. Bei der 2,5 Zonen Klimaautomatik lassen sich die Zonen des Fahrers und des Beifahrers unabhängig voneinander klimatisieren. Zusätzlich lässt sich für die zweite Sitzreihe die Ausblastemperatur des Mittelkonsolenausströmers unabhängig von den vorderen Zonen einstellen. Diese Möglichkeit wird als Schichtung bezeichnet und wird als halbe Zone gezählt.

Die Klimatisierung wird über ein integriertes Heizklimagerät mit einem Gebläse realisiert. Im Klimagerät gibt es jeweils eine Mischluftklappe für die Fahrerseite, Beifahrerseite und für den Fond. Zusätzlich gibt es sieben Luftverteilungsklappen, welche die Luft auf insgesamt 14 Luftausströmer verteilen. Neben diesem Klimagerät verfügt das Fahrzeug über eine Sitzheizung, eine Lenkradheizung und die Möglichkeit die Armauflage der Mittelkonsole zu beheizen. Diese zusätzlichen Heizelemente sind jedoch nicht mit der zentralen Klimaregelung verbunden und müssen einzeln und manuell vom Insassen ein- oder ausgeschaltet werden. Die Heizelemente werden für alle Versuche ausgeschaltet, um etwaige Einflüsse auf die Ergebnisse auszuschließen.



Abbildung 14. Versuchsfahrzeug BMW 6er GT

Das Fahrzeug wird von einem Verbrennungsmotor angetrieben. Dieser Verbrennungsmotor bildet auch die Basis für das Klimatisierungssystem des Fahrzeugs. Der Kältekreislauf wird von einem Kompressor angetrieben. Dieser wiederum ist mechanisch mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt. Der Heizwärmetauscher wird von Wasser aus dem Kühlkreislauf des Verbrennungsmotors durchströmt.

Abbildung 15 zeigt das Klimatisierungssystem des Versuchsfahrzeugs. Das Luftverteilungssystem besteht aus zahlreichen Luftkanälen mit Ausströmern an den Enden. Das Gesamtsystem lässt sich in die Teilsysteme Defrost, Belüftungsebene Front und Fond sowie Fußebene Front und Fond unterteilen. Die Belüftungsebene Front besteht aus zwei indirekten Ausströmern sowie jeweils zwei Mitteldüsen (MD) und Seitendüsen (SD). Die Belüftungsebene im Fond besteht lediglich aus einem zentralen Ausströmer. Besonders auffällig sind die Luftkanäle für die Fußebene im Fond. Die übrigen Luftkanäle sind

weitestgehend von der Instrumententafel bzw. der Mittelkonsole verdeckt. Die Fußraumausströmer der Front Reihe werden in dieser Ansicht ebenfalls von der Instrumententafel verdeckt.

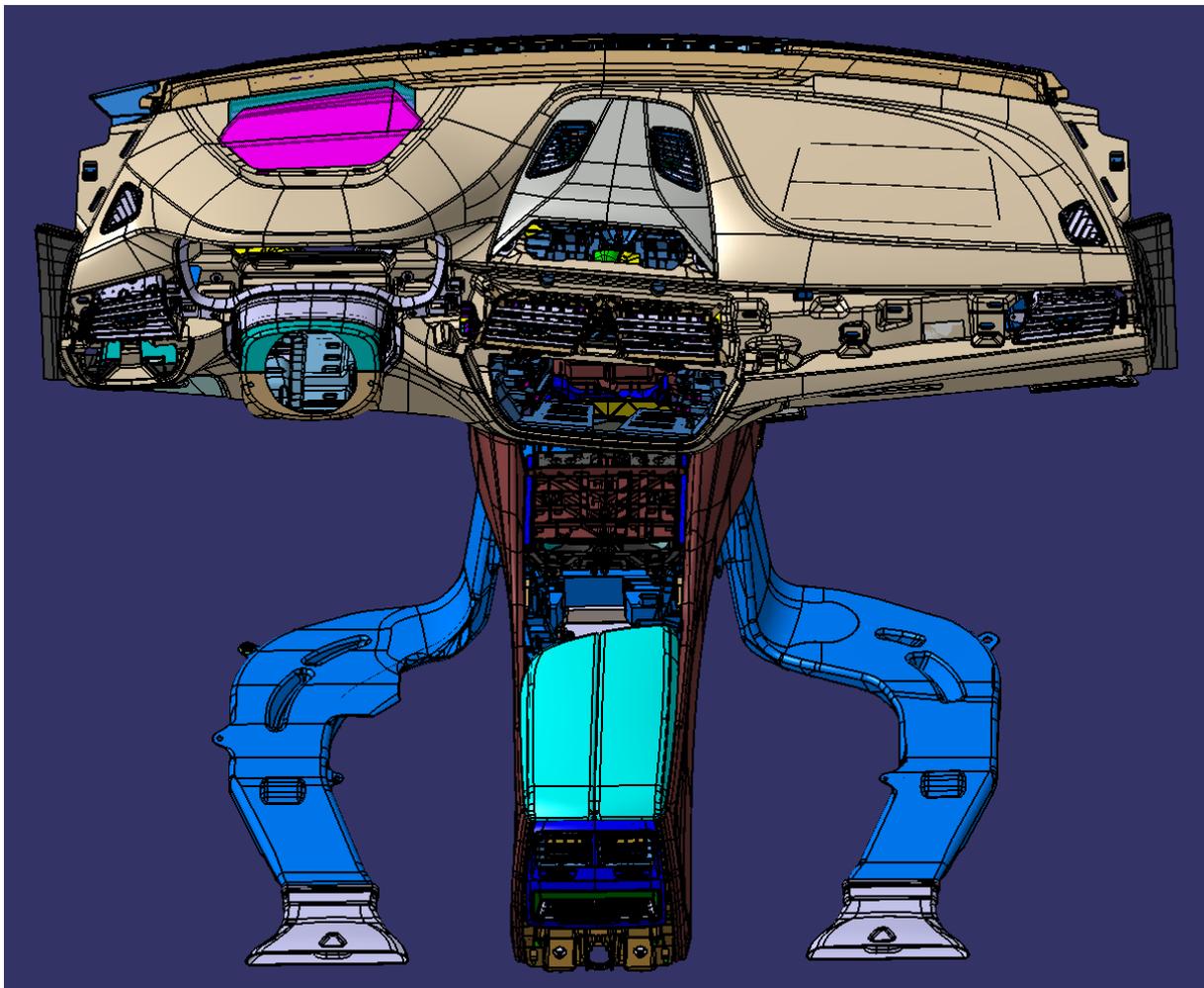


Abbildung 15. Klimatisierungssystem des BMW 6er GT mit 2,5 Zonen Klimaanlage

Teilweise hat die Position einer einzelnen Klappe Auswirkungen auf mehrere Ausströmer. Die Interaktionen zwischen den verschiedenen Klappen und den Ausströmern ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Insgesamt ergeben sich mit den verschiedenen Klappenpositionen, der Gebläseleistung, der Verdampfer Temperatur und der Frischluft-/Umluftklappe 14 Aktuatoren, die das Steuergerät kontrollieren kann. Jeder dieser Aktuatoren kann individuell angesteuert werden. Die einzige Ausnahme bildet die Frischluft-/Umluftklappe. Diese beiden Klappen sind mechanisch miteinander verbunden und werden über einen einzigen Motor gesteuert. Es sind daher nicht alle Kombinationen der Position von Frischluftklappe und Umluftklappe möglich.

Tabelle 1. Interaktionen zwischen Klappen und Luftausströmern

Luftverteilungsklappe:	Beeinflusste Luftausströmer:
Defrostklappe	Defrost links, Defrost zentral, Defrost rechts
Schichtungsklappe Fahrer	Indirekt links, MD links, SD links
Schichtungsklappe Beifahrer	Indirekt rechts, MD rechts, SD rechts

Belüftungsklappe Fahrer	Indirekt links, MD links, SD links
Belüftungsklappe Beifahrer	Indirekt rechts, MD rechts, SD rechts
Fußklappe Fahrer	Fuß Fahrer, Fuß Fahrer Fond
Fußklappe Beifahrer	Fuß Beifahrer, Fuß Beifahrer Fond
Mischklappe Fond	Belüftung Fond

Serienmäßig stützt sich die Klimaregelung im Fahrzeug auf nur wenige Sensoren. Diese sind:

- Solarsensor (Fahrer- und Beifahrerseite)
- Unbelüfteter Innenraum Fühler (UIF)
- Ausblastempertursensor (jeweils Fuß- und Belüftungsebene Fahrer- und Beifahrerseite)
- Verdampfertempertursensor
- Beschlagsensor (Scheibentemperatur und relative Feuchtigkeit an der Scheibe)
- Außenluftqualität

Zusätzliche Information werden von Sensoren aus anderen Systemen abgefragt. Diese sind:

- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Motortemperatur
- Außentemperatur

Neben der serienmäßig verbauten Sensorik wurde eine Vielzahl von zusätzlichen Sensoren für Validierungszwecke und zur Gewinnung von Trainingsdaten permanent ins Fahrzeug eingebaut. Dabei handelt es sich zum größten Teil um Sensoren zur Messung der Lufttemperatur oder der Oberflächentemperatur. Außerdem wurde jeweils ein Sensor zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit im Frischluftansaugtrakt und im Innenraum auf Kopfhöhe platziert. Insgesamt wurden 144 zusätzliche Sensoren im Fahrzeug verbaut. Diese zusätzlichen Sensoren sind nicht mit der Regelung verbunden.

Neben diesen permanent verbauten Sensoren wurden auch verschiedene mobile Messaufbauten verwendet. Diese sind zum einen mobile Messmatten zur Messung der Lufttemperatur im Fußraum, wie sie in Abbildung 9 gezeigt werden. Zum anderen wurde ein Messaufbau zur Bestimmung der Luftmassenströme verwendet. Dieser wird in Abbildung 19 gezeigt und in Kapitel 3.1.1 näher beschrieben.

3.1 Modellierungsansatz

Der Modellierungsansatz bildet den Schwerpunkt der Arbeit. Um den Modellierungsansatz flexibel zu gestalten, wurde entschieden das Modell in mehrere Module aufzuteilen. In Übereinstimmung mit der Kommunalität der Fahrzeugfamilien wurden die drei Module Regler, Klimagerät und Innenraum ausgewählt. Diese Auswahl ist vorteilhaft, da klar definierte physikalische Grenzen zwischen den einzelnen Modulen bestehen.

Abbildung 16 zeigt ein Schema des Modellierungsansatzes. Darin sind die einzelnen Module und die Interaktionen zwischen den Modulen dargestellt. Der Regler berechnet die Sollwerte für die Gebläseleistung, die Verdampfer Temperatur und die Position der verschiedenen Klappen. Diese Informationen werden an das Modul zur Modellierung des Klimagerätes weitergeleitet. Zur Berechnung der Sollwerte benötigt der Regler Informationen über die aktuelle Innenraumtemperatur, einige ausgewählte Ausblastemperaturen und weitere Sensorwerte. Zu diesen Sensorwerten gehören auch die Nutzereingaben die von den Insassen im Human machine Interface (HMI) getätigt werden.

Im Klimagerätmodul werden die Ausblastemperaturen und Massenströme an allen Ausströmern berechnet und an das Modul für den Innenraum weitergeleitet. Zur Berechnung benötigt das Klimagerätmodul neben den Sollwerten aus dem Reglermodul auch direkte Informationen über die Umgebungsbedingungen, da zum Beispiel die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Außentemperatur einen Einfluss auf die berechneten Werte haben.

Eine weitere Aufteilung des Klimagerätmoduls in seine Bauteile ist möglich und würde die Flexibilität des Ansatzes weiter erhöhen. Einige der entstehenden Submodule, insbesondere die Mischluftkammer, sind jedoch nur sehr schwierig zu modellieren. Voruntersuchungen ergaben für ein einzelnes Modul deutlich bessere Ergebnisse als für ein Klimagerätmodul bestehend aus mehreren Submodulen.

Das Innenraummodul berechnet die Innenraumtemperatur und schickt diese an das Reglermodul. Außerdem werden die Äquivalenttemperaturen an den verschiedenen Körperpositionen und die Lufttemperaturen in bestimmten Bereichen berechnet und an die Zielfunktion ausgeleitet. Für die Berechnungen benötigt das Modul neben den Informationen über die Ausblastemperaturen und Massenströme auch Informationen über die Umgebungsbedingungen, da zum Beispiel die Außentemperatur und die Solarintensität einen großen Einfluss auf die Temperaturen im Innenraum haben.

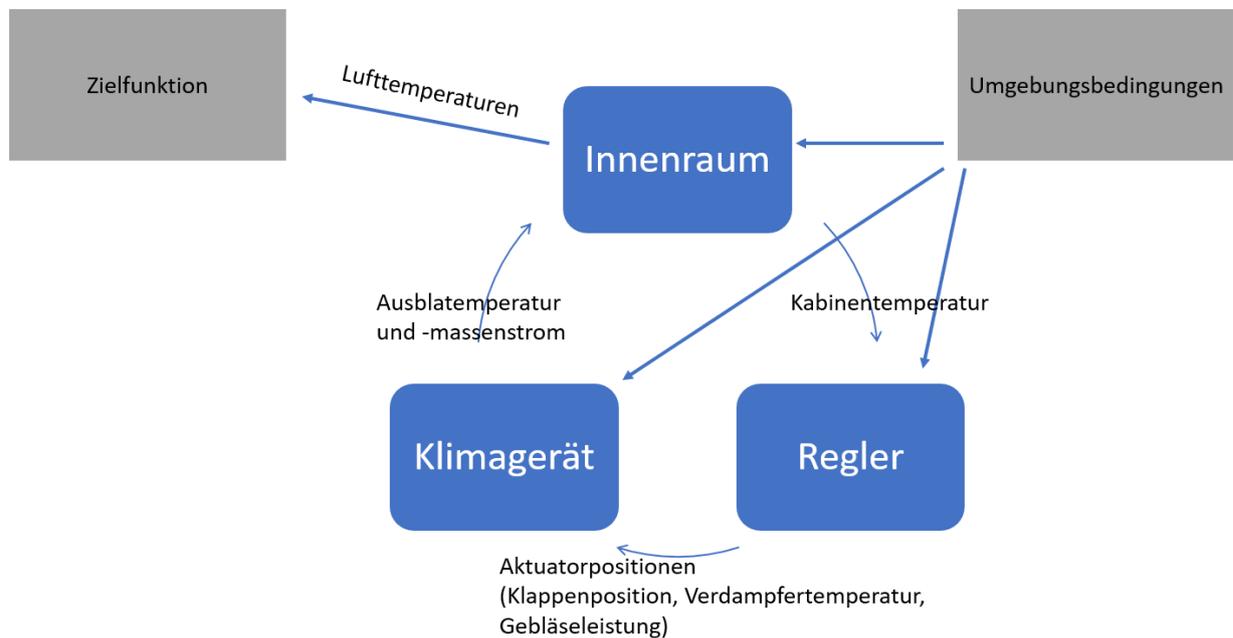


Abbildung 16. Schema des Modellierungsansatzes für das Klimatisierungssystem

Die Funktionslogik des Reglers lag bereits als verwendbares Modell vor und wurde nach einigen Vereinfachungen und Anpassungen für die Modellierung weiterverwendet. Um eine kurze Berechnungszeit zu gewährleisten, wurden Black-Box Modelle für das Klimagerät und den Innenraum verwendet. Das Klimagerätmodul verwendet experimentelle Messdaten als Datengrundlage. Für das Innenraummodell hingegen wurden Simulationsergebnisse als Datengrundlage verwendet.

Die Black-Box Modelle der Module für das Klimagerät und den Innenraum können lediglich die steady state Werte für die jeweiligen Temperaturen vorhersagen. Der Regler ist jedoch auf einen konkreten zeitlichen Verlauf der Eingangssignale angewiesen, da die berechneten Sollwerte ansonsten verfälscht werden. Bei einer direkten Rückführung der steady state Werte an den Regler stellt sich ein instabiles Regelverhalten ein. Daher muss ein transients Verlauf der Temperaturen an das Reglermodul übergeben werden. Um dies zu erreichen werden die steady state Vorhersagen der Black-Box Modelle mit einem PT-1 Glied kombiniert, um das transiente Verhalten zu approximieren. Abbildung 17 verdeutlicht das Prinzip der Rekonstruktion.



Abbildung 17. Approximation des transienten Verlaufs aus den Ergebnissen des Gleichgewichtsmodells

Ein PT-1 Glied hat die Lösung:

$$T(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + c \quad (8)$$

Die Zeitkonstante τ kann dabei vorgegeben sein oder von einem weiteren Black-Box Modell in Abhängigkeit vom derzeitigen Betriebspunkt vorhergesagt werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die zusätzliche Genauigkeit einer variablen Zeitkonstante keinen Einfluss auf die Qualität der Modellierung hat. Daher wurden die Zeitkonstanten experimentell für jede relevante Größe ermittelt und darauffolgend als konstant angenommen. Dies konnte den Berechnungsaufwand deutlich reduzieren.

Der präsentierte Modellierungsansatz trifft einige vereinfachende Annahmen. Aufgrund dieser Annahmen ist das Modell lediglich in der Lage beinahe stationäre Betriebspunkte zu modellieren. Die kritischen Annahmen beziehen sich auf die luftseitigen Temperaturen des Heizwärmetauschers und des Verdampfers. Die Temperatur des Heizwärmetauschers wird als konstant 102 °C angenommen. Die Temperatur des Verdampfers wird entsprechend der Verdampfersolltemperatur angenommen.

Testfahrten mit dem Versuchsfahrzeug haben gezeigt, dass die HWT Temperatur relativ konstant 102 °C beträgt, sobald der Motor aufgewärmt ist und solange die Fahrzeuggeschwindigkeit unter 150 km/h bleibt.

Weitere Versuche zeigten, dass die Verdampfersolltemperatur bei konstanter Motordrehzahl nach spätestens drei Minuten eingeregelt werden kann, sofern der Kältekreislauf in der Lage ist die benötigte Kälte für die Verdampfersolltemperatur bereitzustellen. Dies ist nicht immer der Fall. Bei warmen und feuchten Umgebungen kann es passieren, dass bei einem hohen Luftdurchsatz durch den Verdampfer, die benötigte Temperatur auch bei voller Leistung des Kältekreislaufs nicht erreicht werden kann. Durch die mechanische Kopplung zwischen Kompressor und Fahrzeugmotor, ist die maximale Leistung des Kältekreislaufs ebenfalls von der aktuellen Motordrehzahl abhängig. Diese Einschränkungen müssen durch ein zusätzliches Kennfeld, welches die minimal erreichbare Verdampferetemperatur vorgibt, berücksichtigt werden. Ohne diese Maßnahme, ist eine modellbasierte Applikation für warme und feuchte Umgebungen nicht möglich. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurde dieser Effekt jedoch

vernachlässigt und eine ideale Regelung des Kältekreislaufs auf die gewünschte Verdampfersolltemperatur angenommen.

Die Annahmen bedingen eine Einschränkung der maximal abbildbaren Geschwindigkeit auf 150 km/h. Außerdem können warme und feuchte Außenbedingungen nicht korrekt simuliert werden, da die exakten Grenzen des Kältekreislaufes nicht bekannt sind. Diese Einschränkungen werden als akzeptabel eingeschätzt. Während der Validierungsfahrten wurden die Grenzen der Modellgültigkeit zu jeder Zeit eingehalten.

Das Gesamtmodell besteht aus mehreren Modulen, die die einzelnen Teilsysteme abbilden. Im Folgenden werden die einzelnen Module des Gesamtmodells detailliert vorgestellt.

3.1.1 Klimagerät

Das Modul zur Modellierung des Klimagerätes besteht aus drei Teilen. Zunächst bestimmen Black-Box Modelle, welche mit experimentell ermittelten Daten trainiert wurden, die erwarteten Gleichgewichtstemperaturen und Massenströme. Bei der Erzeugung der Trainingsdaten konnten aufgrund des Versuchsaufbaus nicht alle Außenbedingungen korrekt berücksichtigt werden. Daher werden die im ersten Schritt berechneten Werte mithilfe von einfachen Korrekturmodellen für die Außenbedingungen korrigiert. Im dritten und letzten Schritt wird aus den berechneten korrigierten Gleichgewichtstemperaturen ein korrektes transientes Verhalten abgeleitet. Für die Massenströme ist dieser Schritt nicht notwendig, da Änderungen in den Massenströmen innerhalb weniger Sekunden auftreten und diese Werte nicht an die Regelung zurückgeführt werden. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 18 dargestellt.

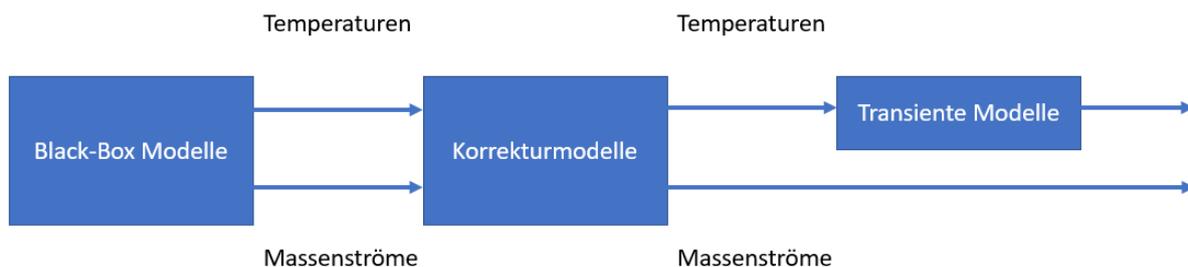


Abbildung 18. Schema des Klimagerät Simulationsmoduls

Die Black-Box Modelle zur Vorhersage der Gleichgewichtswerte wurden mit experimentellen Daten trainiert. Zur Generierung dieser Daten war ein Versuchsaufbau notwendig. Während dieses Versuches wurde das Versuchsfahrzeug in einer Werkstatthalle platziert und im Leerlauf betrieben. Sobald der Verbrennungsmotor seine Betriebstemperatur erreicht hatte, wurde ein fixer Betriebspunkt des Klimagerätes eingestellt und die Ausblastemperaturen und Massenströme über einen Zeitraum von 10 Minuten aufgezeichnet. Danach wurde der nächste Betriebspunkt eingestellt und wiederum die

Ausblastemperaturen und Massenströme aufgezeichnet. Ein Betriebspunkt war jeweils durch konstante Positionen der Klappen, sowie einer konstanten Gebläseleistung und Verdampfersolltemperatur charakterisiert.

Zur Messung der Ausblastemperaturen wurden Thermoelemente genutzt. Diese Temperatursensoren wurden permanent in den Luftkanälen des Luftverteilungssystems in der Nähe der jeweiligen Luftausströmer platziert. Für jeden Ausströmer wurde ein einzelner Temperatursensor verwendet. Dieser wurde mittig im jeweiligen Luftkanal positioniert.

Zur Messung der Massenströme wurden Messaufsätze mit Heißfilmanemometern verwendet. Diese Aufsätze wurden nur während der jeweiligen Messungen angebracht, da die Nutzung des Fahrzeuges mit den installierten Aufsätzen stark eingeschränkt ist. Abbildung 19 zeigt den Versuchsaufbau im Fahrzeug. Dabei sind alle Aufsätze gleichzeitig installiert.



Abbildung 19. Versuchsaufbau im Fahrzeug

Die Messaufsätze wurden individuell für jeden Ausströmer konstruiert. Abbildung 20 zeigt schematisch einen Querschnitt durch die Messaufsätze. Zunächst leitet der Aufsatz die Luft durch eine sich verjüngende Sektion in einen horizontalen Bereich über. Danach folgen ein Gleichrichter und eine Beruhigungsstrecke. Diese Bauteile dienen dazu ein möglichst konstantes und laminares Strömungsprofil in der anschließenden Messsektion sicherzustellen.

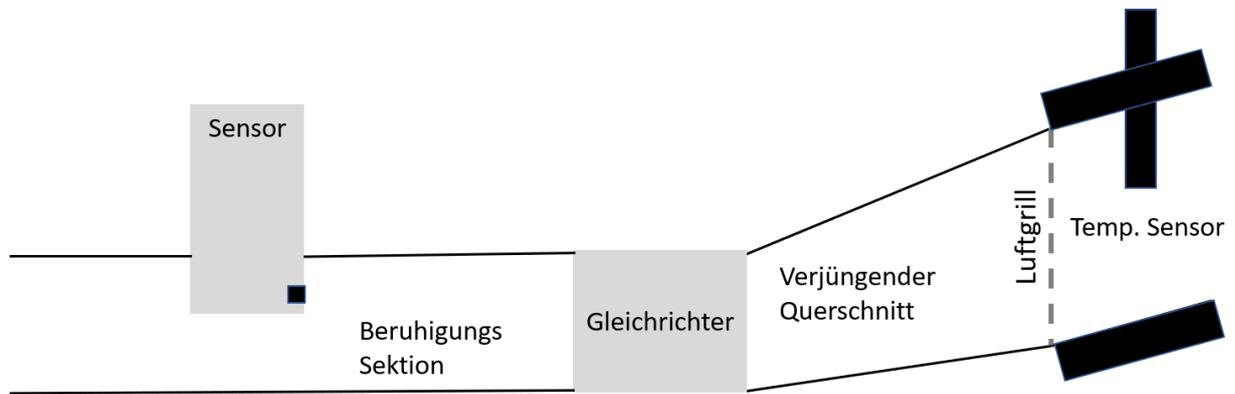


Abbildung 20. Querschnitt der Massenstromaufsätze

Die Gleichrichter bestehen aus zwei feinen Netzen, gefolgt von einer länglichen Wabenstruktur und wurden als Kompromiss zwischen der erreichten Wirkung und dem zusätzlich induzierten Druckverlust ausgewählt. Abbildung 21 zeigt einen der verwendeten Strömungsgleichrichter. Die Ösen an der Außenwand dienen zur Befestigung des Gleichrichters im Fahrzeuginnenraum.



Abbildung 21. Strömungsgleichrichter

Abbildung 22 zeigt eines der verwendeten Heißfilmanemometer. Die Heißfilmanemometer können lediglich die Strömungsgeschwindigkeit orthogonal zur Messöffnung messen. Wenn sowohl das Strömungsprofil und die Luftdichte als auch der Querschnitt der Messsektion bekannt sind, kann von dieser gemessenen Geschwindigkeit auf den Massenstrom durch die Messsektion geschlossen werden. Die Luftdichte hängt vom Umgebungsdruck und der Lufttemperatur ab. Die Lufttemperatur ist bekannt und der Umgebungsdruck wird als konstant angenommen, da infolge der normalen Wetterschwankungen keine großen Fluktuationen erwartet werden. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Luftdichte wurde ebenfalls vernachlässigt, da einerseits der erwartete Einfluss sehr gering ist und andererseits durch den Abkühlvorgang im Verdampfer nur geringe Schwankungen in der Messsektion erwartet wurden.

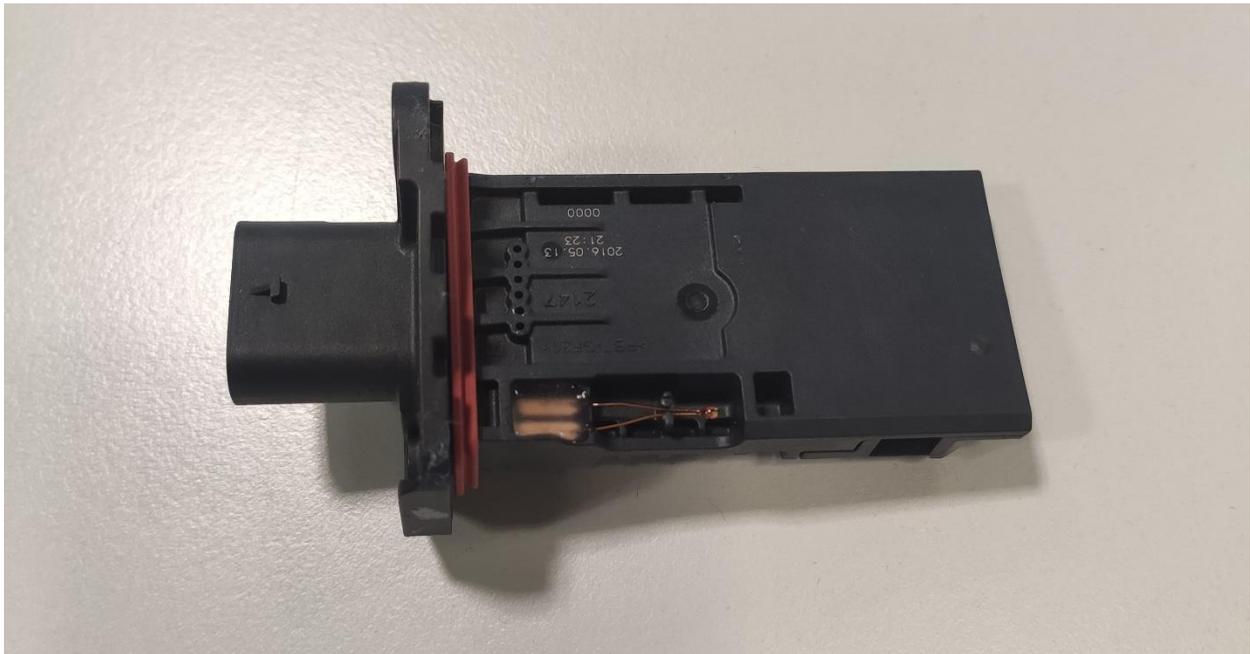


Abbildung 22. Heißfilmanemometer

Um die Kombination aus Messstellenquerschnitt und Strömungsprofil möglichst exakt zu bestimmen, wurde jede Kombination aus Messaufsatz, Gleichrichter und Sensor einzeln kalibriert und soweit möglich nach der Kalibrierung nicht mehr getrennt. Außerdem wurde bei jeder Neuinstallation auf die Positionierung des Sensors in der Messsektion geachtet. Dies wurde auch durch konstruktive Maßnahmen erreicht. Die Kalibrierung wurde mithilfe eines kalibrierten Gebläses durchgeführt. Über dieses Gebläse war der exakte Massenstrom durch die Messstelle bekannt. Auf diese Weise konnte ein Zusammenhang zwischen Sensorausgabe und Massenstrom hergestellt werden. Die Temperaturkorrektur ist bereits in den Sensorwerten enthalten. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die identifizierten Fehlerquellen bei den Massenstrommessungen und eine Abschätzung über deren Einfluss auf die Genauigkeit [62].

Tabelle 2. Fehlerquellen im Massenstrommesssystem

Fehlerquelle	Geschätzte Ungenauigkeit
Montagequalität der Aufsätze	1,9 %
Sensorungenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Klimagerätansteuerung	5,2 %
Ungenauigkeit bei der Kalibrierung	6,7 %
Leckage	12 %
Korrektur für den zusätzlichen Druckverlust	6,5 %

Bei den Temperaturmessungen wurden verschiedene Zeitkonstanten beobachtet. Abhängig vom Massenstrom und dem Unterschied zum vorherigen Betriebspunkt, kann es mehr als 30 Minuten dauern, bevor sich eine Gleichgewichtstemperatur an den Ausströmern einstellt. Für den aufgestellten Versuchsplan würde eine solch lange Testzeit pro Betriebspunkt eine zu lange Versuchszeit ergeben. Daher wurde beschlossen jeden Betriebspunkt für 10 Minuten zu messen und aus diesem Verlauf die

erwartete Gleichgewichtstemperatur zu schätzen. Zur Schätzung der Gleichgewichtstemperatur wurde der Temperaturverlauf wiederum als PT-1 Glied modelliert und der finale Wert aus den Messdaten extrapoliert.

Aus operativen Gründen wurden die Messungen über einen Zeitraum von acht Wochen durchgeführt. Die Umgebung des Fahrzeuges war nicht klimatisiert. Daher kam es während der Messkampagne zu Schwankungen der Außentemperatur im Bereich von 21 °C bis zu 32 °C. Die Außentemperatur hat einen Einfluss auf die Ausblastemperaturen. Da die Außentemperatur jedoch nicht kontrolliert werden konnte, ist diese Information nicht in den Trainingsdaten aufgenommen worden. Aus diesem Grund müssen die gemessenen Ausblastemperaturen auf den erwarteten Wert bei einer einheitlichen Außentemperatur von 22 °C korrigiert werden. Für diese Normierung wurde das Korrekturmodell verwendet. Dieses wird später vorgestellt.

Tabelle 3 listet die identifizierten Fehlerquellen bei den Temperaturmessungen und eine Abschätzung über deren Einfluss auf die Genauigkeit auf [62]. Das Verfahren zur Vorhersage der Gleichgewichtstemperatur wurde in dieser Publikation als Hauptfehlerquelle identifiziert. Daher wurde das Verfahren verbessert. Diese Verbesserungen erklären die deutliche Verringerung der Ungenauigkeit im Vergleich zu den Werten aus der Publikation. Eine Wiederholung der Messung war dazu nicht notwendig. Die Hauptpunkte der Verbesserungen waren Anpassungen in der Datenaufbereitung und eine Mittelung aus mehreren unabhängigen Schätzwerten.

Tabelle 3. Fehlerquellen im Temperaturmesssystem

Fehlerquelle	Geschätzte Ungenauigkeit
Sensorungenauigkeit	1,5 K
Schätzung der Gleichgewichtstemperatur	1,2 K
Reproduzierbarkeit der Klimagerätensteuerung	1,2 K

3.1.1.1 Versuchsplan

Der Versuchsplan wurde erzeugt um den kompletten Betriebsbereich des Klimagerätes abzudecken. Dazu wurden alle Klappenpositionen als unabhängige Variablen behandelt und der volle Bewegungsbereich von 0 bis 100 % wurde erlaubt. Zusätzlich zu den Klappenpositionen waren auch die Gebläseleistung und die Verdampfersolltemperatur als unabhängige Variablen im Versuchsplan vertreten. Außenbedingungen, insbesondere die Außentemperatur, wurden nicht in den Versuchsplan integriert, da keine Möglichkeit bestand die Variablen mit vertretbarem Aufwand zu kontrollieren.

Mit den resultierenden 14 Designvariablen wurde der Versuchsplan mittels der Sobolfolge erzeugt. Zur Initialisierung der Folge wurde eine zufällige Zahl und ein zufälliger Übersprungsintervall ausgewählt. Auf eine nachträgliche Überprüfung des erzeugten Versuchsplanes wurde verzichtet.

3.1.1.2 Zusätzliche Trainingsdaten

Um eine größere Trainingsdatenbasis zu generieren wurden zusätzliche Daten aus den Fahrzeugerprobungen generiert. Dies war nur für die Ausblastemperaturen möglich, da ein Fahrbetrieb mit dem installierten Massenstrommesssystem nicht möglich ist. Zur Erzeugung der zusätzlichen Trainingsdaten, wurden alle vorhandenen Aufzeichnungen von Fahrten mit dem Versuchsfahrzeug untersucht. Betriebspunkte, an denen alle Bedingungen aus Tabelle 4 erfüllt sind, wurden ausgewählt. Zur Erfüllung der Bedingungen musste der jeweilige Messwert über einen Zeitraum von 15 Minuten innerhalb der angegebenen Spanne bleiben. Danach wurden die gemessenen Temperaturen abhängig von der gemessenen Außentemperatur normiert.

Tabelle 4. Bedingungen zur Auswahl eines zusätzlichen Trainingspunktes

Kriterium	Maximale Veränderung
Klappenpositionen	3 %
Außentemperatur	4 K
Verdampfertemperatur	3 K
Geschwindigkeit	50 km/h
Gebälseleistung	10 %
Ausblastemperaturen	1 K

Diese Grenzwerte wurden durch visuelle Inspektion der Testfahrtdaten festgelegt. Eine Analyse der zusätzlich erhaltenen Trainingsdaten bestätigte die Plausibilität der zusätzlichen Daten.

Die gesammelten Daten wurden verwendet, um die Modelle für die Vorhersage der statischen Werte zu erzeugen. Abbildung 23 zeigt ein Schema dieses Prozesses. Zunächst werden die relevanten Daten ausgewählt und eventuelle Ausreißer entfernt. Nachdem die relevanten Daten ausgewählt wurden, werden diese in ein Trainings- und ein Validierungsset geteilt und zur Auswahl der besten Modelle verwendet. Der Prozess zur Auswahl der Modelle stellt dabei eine Kombination aus einer Filterung und einer Selektion der relevanten Attribute und der besten Modellarten sowie deren Parameter dar.

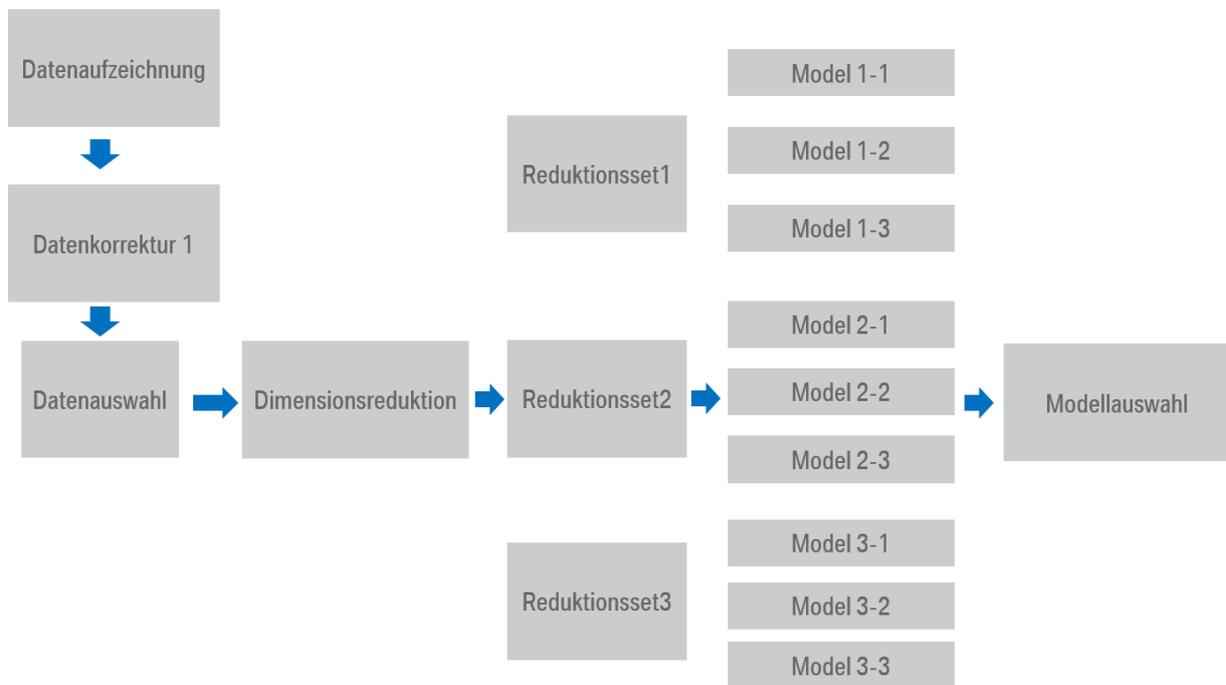


Abbildung 23. Schema des Auswahlprozesses für ein Black-Box Modell

Auf diese Weise konnte die Qualität der aus den Versuchsfahrten erhaltenen Trainingsdaten mit denen aus dem stationären Fahrzeugversuch verglichen werden.

Da Voruntersuchungen keine eindeutige Tendenz zeigten, wurden drei verschiedene Algorithmen zur Auswahl der relevanten Dimensionen angewendet. Zusätzlich wurde jeweils auch das volle Set mit allen Attributen verwendet. Die drei verwendeten Algorithmen sind:

- Neighborhood component analysis [63]
- ReliefF [64]
- Partial least squares regression [65]

Nachdem die relevanten Attribute bestimmt wurden, wurden für jede Output Größe verschiedene Modelle trainiert. Es wurden Support Vector Maschinen (SVM), Gaus Prozess Regression (GPR) und ein Ensemble aus Regressionsbäumen trainiert. Dabei wurde für jede Modellart auch eine Optimierung der Parameter, die den Trainingsprozess beeinflussen, durchgeführt, um den kleinstmöglichen Generalisierungsfehler zu erreichen. Dieser Vorgang wird auch als Hyperparameteroptimierung bezeichnet. In den Versuchen wurden Daten für 650 Betriebspunkte gesammelt. Davon wurden 600 für das Training und 50 für die Validierung verwendet.

Nach dieser Optimierung wurde der RMSE der drei Modelle für das Validierungsset berechnet und das beste Modell für die weitere Verwendung ausgewählt. Zudem wurde die Berechnungszeit der Modelle

untersucht und Modelle mit sehr langen Berechnungszeiträumen von der Auswahl ausgenommen. Eine Gewichtung nach der exakten Berechnungszeit fand jedoch nicht statt.

Der durchschnittliche Fehler für Temperaturen belief sich bei den letztendlich ausgewählten Modellen auf 3,1 K. Die geschätzte durchschnittliche Unsicherheit beträgt 4,4 K. Für diese Berechnung wurden die Ausströmertemperaturen der Defrostausströmer ausgenommen, da diese teilweise deutlich größere Fehler aufwiesen. Für diese Klasse betrug der RMSE 6,8 K. Die größere Unsicherheit bei diesen Temperaturwerten lässt sich mit den sehr geringen Massenströmen und der schwierigen Platzierung der Temperatursensoren erklären. Durch die geringen Massenströme kommt es zu starken Schwankungen in den gemessenen Temperaturen. Außerdem sind die Temperatursensoren sehr nah an den Ausströmern platziert. Durch den geringen Massenstrom kann es daher zu einer Vermischung der Umgebungsluft mit der Luft an den Temperatursensoren kommen. Durch die typischerweise geringen Massenströme ist der Einfluss dieser Ausblastemperaturen auf die Innenraumtemperaturen zudem sehr gering. Daher wird diese erhöhte Ungenauigkeit an den Defrostausströmern akzeptiert.

Für die Massenströme ergab sich ein RMSE von 0,15 kg/min. Abbildung 24 zeigt exemplarisch die Werte aus dem Validierungsset und den entsprechenden Vorhersagen des trainierten Modells. In diesem Fall geben die Daten die Ausströmertemperatur für die Belüftungsebene auf der Fahrerseite an.

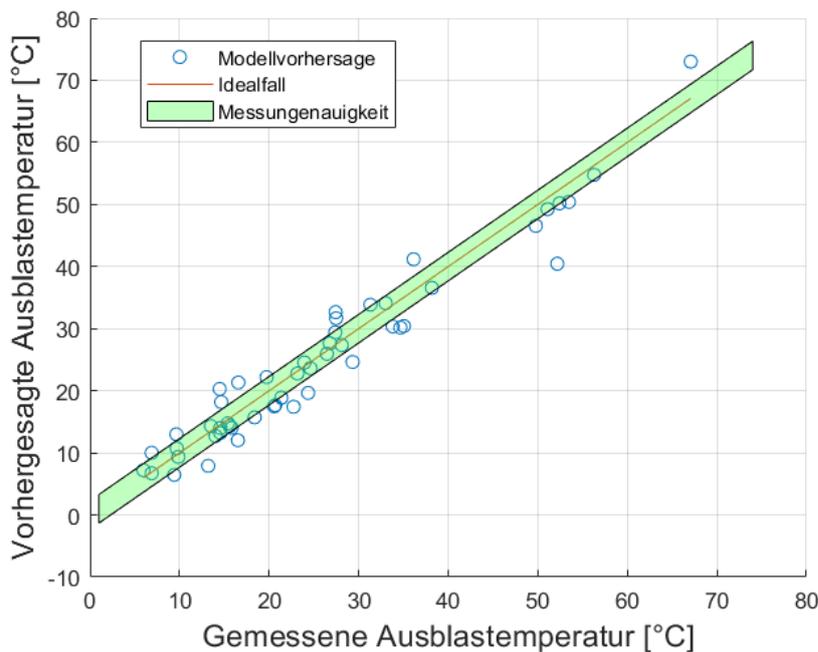


Abbildung 24. Validierung eines Black-Box Modells am Beispiel der Belüftungstemperatur der Fahrerseite

Korrekturmodelle

Die Außenbedingungen sind in den Trainingsdaten der Black-Box Modelle nicht enthalten. Die Außenbedingungen, insbesondere die Außentemperatur und die Fahrzeuggeschwindigkeit haben jedoch einen messbaren Einfluss auf die Ausblastemperaturen und Massenströme. Um diese Effekte

berücksichtigen zu können, wurden Korrekturmodelle entwickelt, die die Ausgaben der Black-Box Modelle für die jeweiligen Außenbedingungen korrigieren.

Versuche im klimatisierten Windkanal ergaben einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und der Ausblastemperatur. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, werden die Luftkanäle als Wärmewiderstände modelliert. Der Wärmewiderstand R ist dabei der Quotient des Temperaturunterschiedes zwischen Ausblastemperatur und Außentemperatur ΔT und der Änderung der Wärmeübergangsrate durch die Wände des Luftkanals $\Delta \dot{Q}$.

$$R = \frac{\Delta T}{\Delta \dot{Q}} \quad (9)$$

Die Werte für den Wärmewiderstand wurden in einem Fahrzeugversuch ermittelt. In diesem Versuch wurde das Fahrzeug im klimatisierten Windkanal in einem stationären Betriebspunkt des Klimagerätes betrieben. Sobald die Ausblastemperaturen ihren Gleichgewichtszustand erreicht hatten, wurde die Temperatur im Windkanal graduell verändert. Nachdem der Windkanal und die Ausblastemperaturen ihre neuen Gleichgewichtszustände erreicht hatten, wurden die Veränderungen der Ausblastemperaturen bestimmt und daraus die Wärmewiderstände für jeden Luftkanal berechnet. Dieses Experiment wurde zweimal durchgeführt. Dabei wurden sowohl das Klimagerät als auch der Windkanal in unterschiedlichen Betriebspunkten betrieben. Für das Korrekturmodell wurde jeweils der Mittelwert der ermittelten Wärmewiderstände verwendet. Im weiteren Verlauf wurde dieser Wert als konstant für den jeweiligen Kanal angenommen.

Die Fahrzeuggeschwindigkeit hat einen Einfluss auf den Gesamtmassenstrom. Durch die Fahrzeuggeschwindigkeit bildet sich ein Gebiet hohen Luftdrucks im Bereich der Luftansaugung. Des Weiteren verringert sich der Luftdruck im Bereich der Abluftöffnungen. Beide Effekte führen dazu, dass sich der Gesamtmassenstrom bei konstantem Betriebspunkt des Klimagerätes erhöht. Nach Bernoulli skaliert der dynamische Druck q quadratisch mit der Luftgeschwindigkeit v . Der Proportionalitätsfaktor ist dabei 0,5-mal die Luftdichte ρ .

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (10)$$

Es wird angenommen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem dynamischen Druck und dem Gesamtmassenstrom m besteht.

$$m = m_0 \cdot (1 + k \cdot q) \quad (11)$$

$$m = m_0 \cdot \left(1 + k \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2\right) \quad (12)$$

In einem Windkanalversuch wurde die lineare Konstante zu 0,00021 bestimmt. In diesem Versuch wurde der Betriebspunkt des Klimagerätes konstant gehalten und die Windgeschwindigkeit schrittweise von 50 km/h auf 250 km/h erhöht. Danach wurde ein anderer Betriebspunkt des Klimagerätes angefahren und das Prozedere wiederholt. Insgesamt wurden vier verschiedene Betriebspunkte angefahren. Abbildung 25 zeigt die Messwerte aus diesen Versuchen. Diese Messungen bestätigen die Annahme eines quadratischen Zusammenhanges zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Gesamtmassenstrom. Eine

Veränderung der Ausblastemperaturen oder der Verteilung des Massenstromes zwischen den einzelnen Ausströmern konnte nicht beobachtet werden.

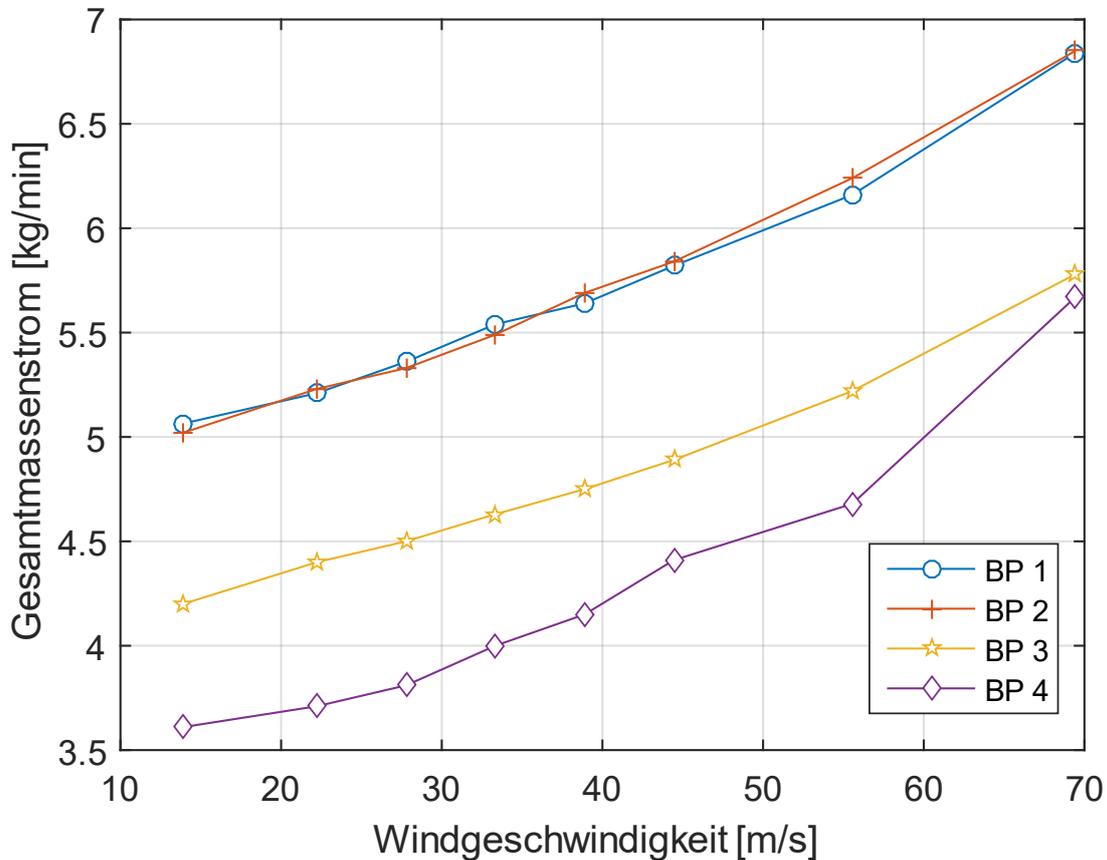


Abbildung 25. Gesamtmassenstrom in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Neben diesen Größen gibt es weitere Umgebungsbedingungen, die einen Einfluss auf die Ausblastemperaturen und Massenströme haben. Der Einfluss der Umgebungsdichte, Feuchte, Solarintensität, Niederschlag und der Innenraumtemperatur wurde untersucht. In den verschiedenen Experimenten konnte jedoch kein relevanter Einfluss ermittelt werden. Daher werden diese Einflüsse in den Korrekturmodellen nicht berücksichtigt.

Die Werte der Trainingsdaten sind auf die physisch aufgetretenen Werte limitiert. Die Black-Box Modelle können jedoch auch Werte vorhersagen, die außerhalb des physikalisch Möglichen liegen. Diese Fälle treten nur selten auf, da bei der Erzeugung des Trainingsplans auf eine möglichst vollständige Abdeckung des Betriebsbereichs geachtet wurde. Um diese Fälle zu verhindern, werden unlogische Vorhersagewerte herausgefiltert. Dies bezieht sich sowohl auf die Ausblastemperaturen als auch auf die Massenströme. Tabelle 5 fasst die implementierten Regeln zusammen.

Tabelle 5. Limitierungen der Vorhersagewerte

Vorhergesagte Größe	Limitierung
Maximale Ausblasttemperatur	102 °C (Heizwärmetauschertemperatur)
Maximale Ausblasttemperatur für Feedback Signale	81 °C (Maximaler Ausgabewert der verwendeten Sensoren)
Minimale Ausblasttemperatur	3 °C (Minimale Verdampferemperatur)
Minimaler Massenstrom	0 kg/s

Die Limitierung der minimalen Ausblasttemperatur ist nicht immer physikalisch sinnvoll. Bei stark negativen Außentemperaturen sind auch Ausblasttemperaturen im negativen Bereich denkbar. Bei solchen Umgebungsbedingungen ist von einem starken Heizbedarf im Fahrzeuginnenraum auszugehen. Dieser Heizbedarf geht mit hohen Ausblasttemperaturen einher. Daher spielen die Fälle negativer Ausblasttemperaturen in der praktischen Anwendung keine Rolle und diese Vereinfachung der Limitierung wird als unproblematisch eingeschätzt.

3.1.1.3 Abschätzung der Gesamtgenauigkeit

Aus den einzelnen Genauigkeiten der einzelnen Komponenten, Trainingsdaten, Black-Box Modelle und Korrekturmodelle lässt sich die Genauigkeit des Klimagerätmodells abschätzen. Diese Schätzung basiert auf der Methode aus der ISO Norm 21748 [66]. Die einzelnen Fehlerquellen werden dabei als unabhängig voneinander angenommen. Für die Temperaturvorhersage ergibt sich eine Genauigkeit von 2,3 K und für die Massenströme eine Genauigkeit von 16,2 %.

3.1.2 Innenraum

Das Innenraummodell besteht ebenfalls aus einer Reihe von Black-Box Modellen, die die statischen Gleichgewichtswerte berechnen und einem zweiten Teil, der aus der Abfolge der Gleichgewichtswerte einen transienten Verlauf erzeugt. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen des Modells werden in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6. Übersicht der Modelleingänge und -ausgänge

Modelleingänge	Modellausgänge
Außentemperatur	Äquivalenttemperatur
Fahrzeuggeschwindigkeit	Lufttemperaturen Kopfraum
Solarintensität	Lufttemperaturen Fußraum
Sonnenposition	Innenraumsensortemperatur
Ausblasttemperaturen (14)	-
Ausblasmassenströme (14)	-

Eine messtechnische Erfassung der Datengrundlage ist extrem aufwändig und zeitintensiv. Daher wurde die Datengrundlage für das Training der Black-Box Modelle des Innenraummoduls simulativ erzeugt. Um

den Einfluss der Datengrundlage auf die Modelle untersuchen zu können, wurden unabhängig voneinander zwei Pfade beschritten. Als Datengrundlage für die Black-Box Modelle werden Simulationsergebnisse von zwei verschiedenen thermischen Berechnungstools verwendet. Die Anzahl der jeweils berechneten Äquivalenttemperaturen und Lufttemperaturen variiert abhängig von der Berechnungsmethode für die Trainingsdaten. Bei diesen Berechnungen werden alle Umgebungsbedingungen direkt abgebildet. Daher sind keine zusätzlichen Korrekturmodelle notwendig. Obwohl beide Berechnungstools transiente Temperaturverläufe berechnen können, wurden lediglich die stationären Endwerte der einzelnen Simulationen in die Datengrundlage aufgenommen. Mit dieser Datengrundlage wurden im weiteren Verlauf zwei unabhängige Sätze von Black-Box Modellen trainiert.

Im Folgenden werden die beiden Berechnungstools, die die Datengrundlagen erstellen, näher beschrieben. Dies sind zum einen die Indoor Environmental Simulation Suite (IESS) [67] und zum anderen eine Kombination aus den kommerziellen Simulationsprogrammen Taitherm und Star CCM+. Mit IESS wurden 2200 Simulationen durchgeführt und mit Taitherm 1000. Der Unterschied in der Anzahl der verfügbaren Ergebnisse begründet sich mit den unterschiedlichen Laufzeitanforderungen der beiden Simulationsprogramme. Die Berechnung der 2200 Simulationen mit IESS dauerte etwa zehn Tage auf einem Prozessor mit sechs Kernen. Die Berechnung der 1000 Taitherm-Simulationen benötigte etwa 40 Tage auf einem Rechencluster mit 18 Kernen. Die Ergebnisse der Simulationen wurden für das Training und die Validierung von zwei unabhängigen Sätzen an Black-Box Modellen verwendet. Abbildung 26 fasst den Ablauf zur Erzeugung der beiden Modellvarianten zusammen. Die blauen Pfeile repräsentieren dabei die Schritte während der Modellberechnung und die schwarzen Pfeile die Prozesse zum Training der Modelle.

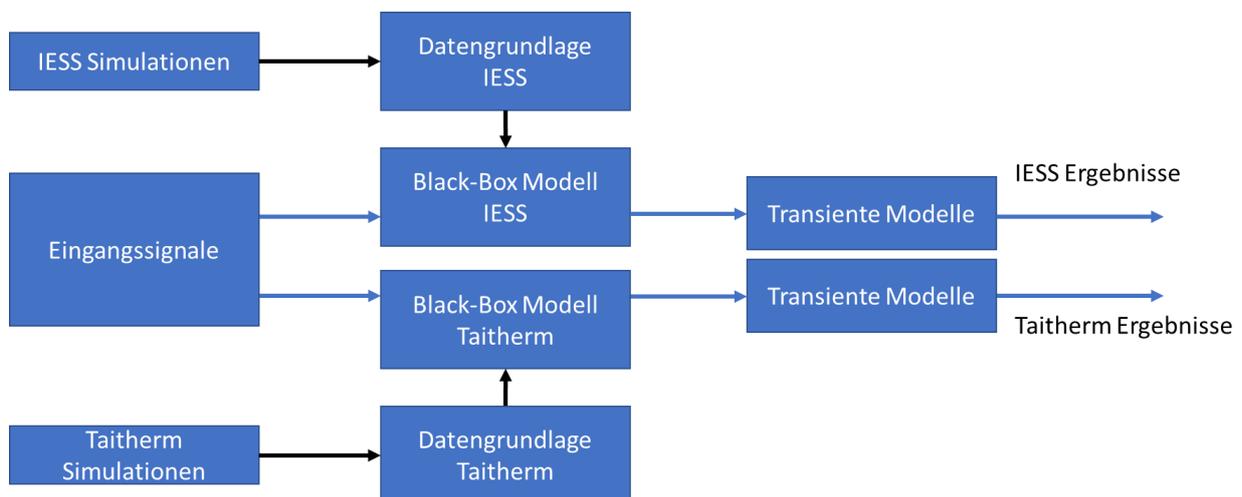


Abbildung 26. Ablauf zur Erzeugung der Varianten des Innenraummoduls

IESS

IESS teilt den Innenraum in bis zu 400 Volumenelemente ein und berechnet einen transienten Verlauf der Temperaturen der verschiedenen Luftvolumen. Die Berechnung der Luftvolumen basiert auf dem Velocity Propagating Zonal (VEPZO) Modell [68]. Dieses Modell ist in Modelica implementiert und berechnet die Luftbewegung zwischen den einzelnen Volumen. Abbildung 27 zeigt ein Simulationsergebnis des Modells.

Darin sind deutlich die Grenzen zwischen den einzelnen Volumen sichtbar. Die Farbe gibt die durchschnittliche Lufttemperatur innerhalb des Volumens in Grad Celsius an. Aufgrund der begrenzten Anzahl der Volumen, ist die Geometrie des Innenraumes stark vereinfacht. Durch diese Vereinfachung müssen teilweise auch Ausströmer zusammengefasst werden, da sich mehrere Ausströmer im selben Volumen befinden. Im Falle von zusammengefassten Ausströmern wurden die erwarteten Massenströme der Ausströmer zusammengerechnet. Außerdem wurde aus den Ausrichtungen der Ausströmer eine konstante Ausrichtung für den kombinierten Ausströmer berechnet. Veränderungen im Massenstromverhältnis der einzelnen Ausströmern werden vom kombinierten Ausströmer nicht berücksichtigt.

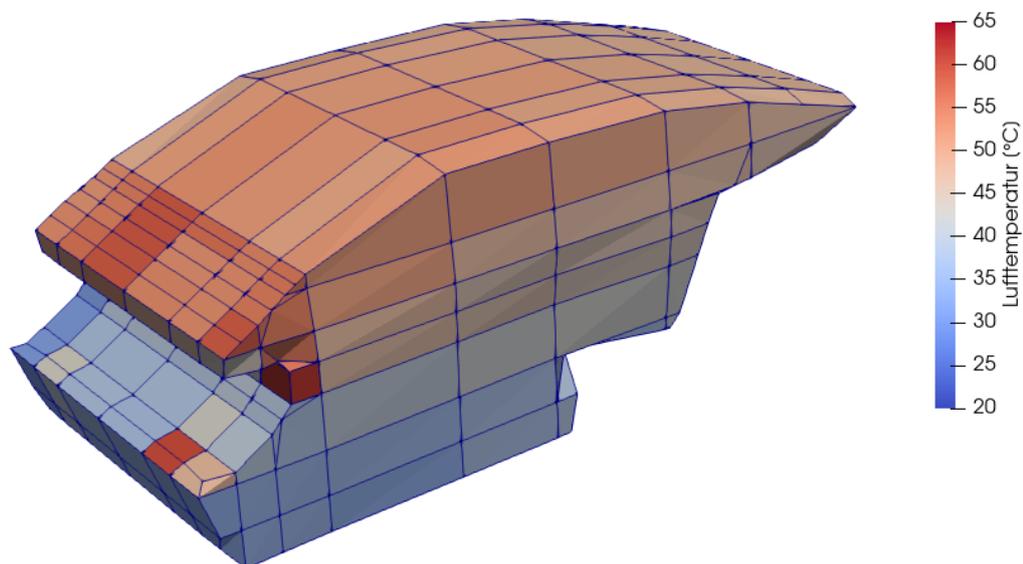


Abbildung 27. IESS Simulationsergebnis

Das IESS-Modell berechnet einen zeitlichen Verlauf der Temperaturen. Die Umschließungsflächen sind jedoch als reine Wärmeleiter ohne Wärmekapazität modelliert. Daher sind keine korrekten zeitlichen Verläufe zu erwarten und lediglich die erreichten Gleichgewichtstemperaturen können verwendet werden. Aus diesem Grund wurden für die Validierung des Modells lediglich die Gleichgewichtstemperaturen verwendet. Die errechneten Temperaturen wurden mit gemessenen Temperaturen verglichen. Diese Validierungsdaten wurden in zusätzlichen Klimawindkanalexperimenten ermittelt. Tabelle 7 fasst die Bedingungen, unter denen die Validierungsversuche stattgefunden haben, zusammen. Die Außenbedingungen waren jeweils konstant und wurden aus operativen Gründen zwischen den Versuchen nicht geändert.

Tabelle 7. Betriebsbedingungen der Validierungsfälle

Nummer	Geschwindigkeit [km/h]	Außentemperatur [°C]	Solarlast [W/m ²]	Relative Feuchtigkeit [%]	Betriebsmodus
1	50	35	400	25	Nur Fondbelüftung
2	50	35	400	25	Nur Defrost geschlossen
3	50	35	400	25	Alle Klappen offen, Umluft
4	50	35	400	25	Nur Belüftung Fahrerseite

Der RMSE der Simulation für diese vier Validierungsfälle betrug für alle berechneten Temperaturen 3,7 K. Die Standardabweichung der Fehler für die relevanten Datenpunkte betrug 3,2 K. Für Einzelwerte konnten in Einzelfällen Abweichungen von bis zu 10 K beobachtet werden.

Taitherm

Das zweite Berechnungstool basiert auf dem Finite Elemente Tool Taitherm und der Strömungssimulationssoftware Star CCM+. Im Folgenden wird diese Lösung vereinfacht als Taitherm bezeichnet. In diesem Tool wird der Innenraum in etwa 17 Millionen Volumen unterteilt. Die Strömung wird mittels eines Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) Ansatzes gelöst. Für die Festkörper wird ein Finite Elemente Ansatz verwendet und die Strahlung wird mittels Sichtfaktoren modelliert. Abbildung 28 zeigt die Oberfläche des verwendeten Modells.

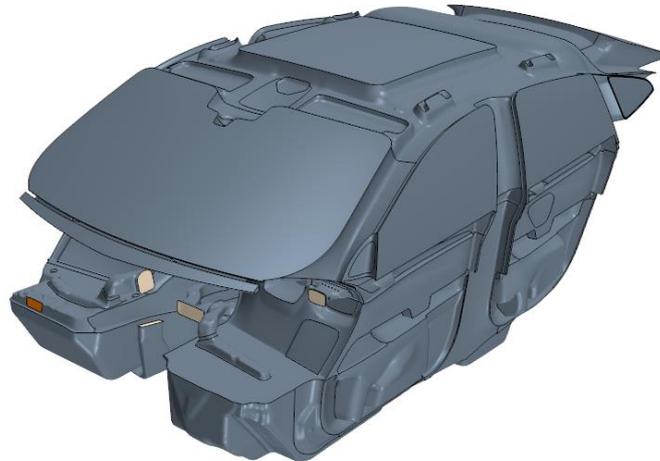


Abbildung 28. Modellierung in Star CCM+

In diesem Modell ist die tatsächliche Geometrie deutlich detaillierter abgebildet. Wie zu erkennen ist, werden lediglich die Umschließungsflächen des Innenraumes abgebildet. Die Geometrie der darauf aufbauenden Strukturen bis zur Außenhaut des Fahrzeugs wird lediglich über Annahmen zu deren kombinierten thermischen Eigenschaften modelliert. Es werden zusätzlich eine Vielzahl von Annahmen über die Randbedingungen getroffen. Insbesondere die Annahmen für die Strömungsbedingungen an den Ausströmern sowie die Materialeigenschaften der Umschließungsflächen basieren auf Erfahrungswerten und sind daher fehlerbehaftet.

Das Taitherm-Modell wurde ebenfalls mithilfe der Messungen aus dem Klimawindkanal validiert. Tabelle 7 fasst die Betriebsbedingungen der Validierungsfälle zusammen. Für die Trainingsdaten werden wiederum die errechneten Beharrungstemperaturen verwendet. Daher wurden zur Abschätzung des Modellierungsfehlers die errechneten und gemessenen Beharrungstemperaturen verglichen. Über die relevanten Temperaturen wurde ein RMSE von 2,4 K ermittelt. Die Standardabweichung des Fehlers beträgt 2 K. Neben diesem normalverteilten Fehler besteht auch ein systematischer Fehler von 3,6 K. Fast immer werden zu warme Innenraumtemperaturen vorhergesagt. Um diesen beobachteten Fehler auszugleichen, wurde die Simulation angepasst, sodass kein systematischer Fehler mehr beobachtet werden kann. Vereinzelt wurden in den Ergebnisse Abweichungen bis zu 12 K beobachtet.

3.1.3 Sensorik

Der Regler verwendet Sensorsignale um Informationen über die Außenbedingungen zu erhalten. Diese Informationen können jedoch fehlerbehaftet sein. Obwohl die exakten Außenbedingungen in der

Simulation bekannt sind, müssen trotzdem die fehlerbehafteten Signale der Sensoren verwendet werden, um ein vergleichbares Verhalten zwischen Simulation und Wirklichkeit zu gewährleisten.

Zahlreiche Vorversuche ergaben, dass lediglich der Solarsensor einen relevanten und berechenbaren Fehler erzeugt. Die Fehler der verschiedenen Temperatursensoren sind im fahrenden Zustand vernachlässigbar.

Insbesondere der sogenannte Heat pick up Effekt ist für die angestrebte Anwendung nicht relevant. Dieser Effekt kann die Ausgabe der Temperatursensoren durch zusätzlich eingetragene Wärme durch den Motor oder aufgeheizte Oberflächen verfälschen. Besonders betroffen davon ist der Sensor für die Außenlufttemperatur. Im Stillstand mit aufgeheiztem Motor und starker Solareinstrahlung kann es zu erheblichen Abweichungen kommen. Der Effekt wird durch den Fahrtwind jedoch deutlich reduziert und zusätzlich bereits in der Regelung kompensiert. Die verbleibende Abweichung ist daher gering und kann vernachlässigt werden. Dies wurde durch einen zweiten Außenlufttemperatursensor, der auf dem Fahrzeugdach montiert war, bestätigt.

Abbildung 29 zeigt eine Frontalansicht des oberen Bereichs der Windschutzscheibe des Fahrzeugs. Die beiden separaten Flächen des Solarsensors für die Fahrerseite und die Beifahrerseite sind deutlich zu erkennen. Außerdem ist unterhalb des „Connected Drive“ Schriftzuges ein kleiner Punkt zu erkennen. Dies ist der Beschlagsensor. Beide Sensoren sind im Fuß des Rückspiegels integriert und daher vom Innenraum aus nicht zu erkennen. Das gelbe Quadrat neben dem Beschlagsensor dient lediglich zur Markierung des Versuchsfahrzeugs innerhalb der Erprobungsflotte.

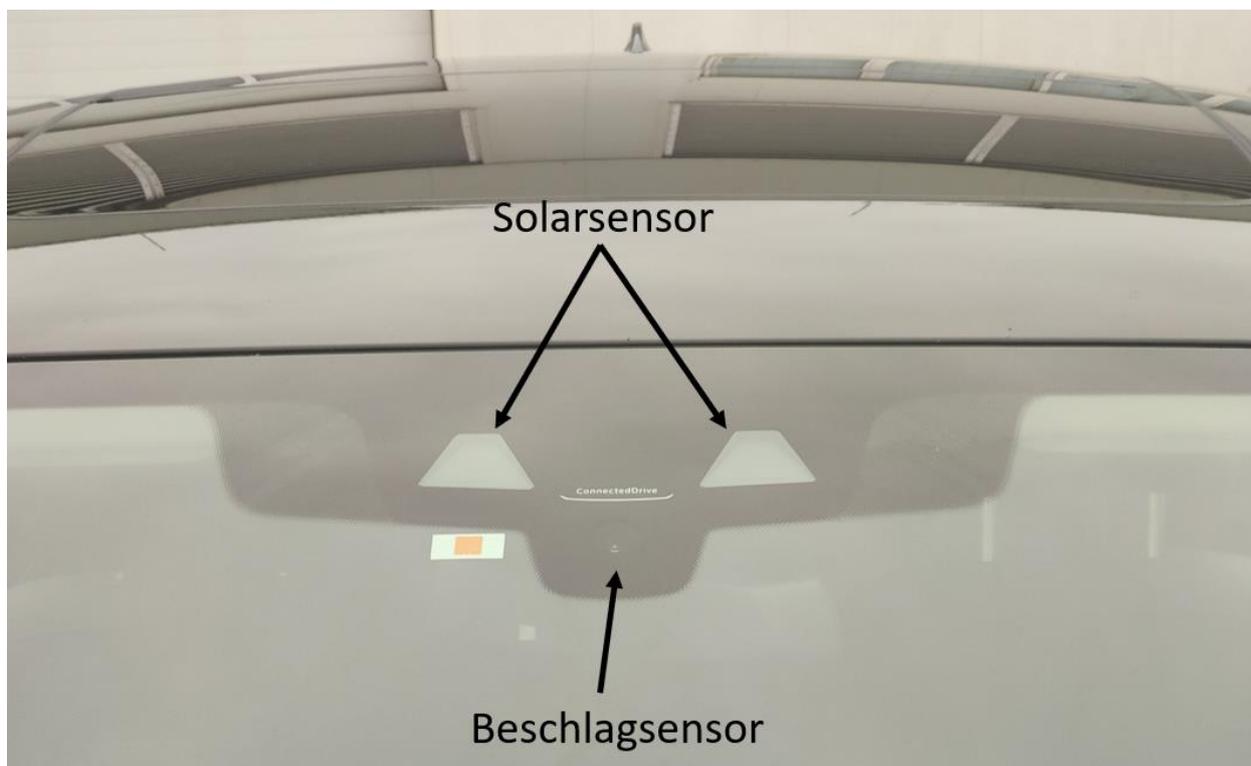


Abbildung 29. Positionierung des Solarsensors

Der Solarsensor ist ein gerichteter Sensor. Daher erfasst er die Strahlung nur aus gewissen Richtungen. Insbesondere Strahlungsquellen, die sich hinter dem Fahrzeug befinden, werden nicht erfasst. Abbildung 30 zeigt die Richtcharakteristik des Solarsensors auf der Fahrerseite. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Maximum bei einem Azimut-winkel von etwa -45° liegt. Die Richtcharakteristik des Solarsensors der Beifahrerseite ist symmetrisch zu dieser Richtcharakteristik. Hier liegt das Maximum jedoch bei $+45^\circ$ Azimut-winkel. Neben der Richtung der auftreffenden Strahlung, spielt auch die Intensität bei der Bestimmung des Sensorsignals eine Rolle. Beide Informationen wurden verwendet, um im Modell den Sensorwert in Abhängigkeit von der Solarintensität und der Position der Sonne relativ zum Fahrzeug zu bestimmen.

Die Richtcharakteristik des Solarsensors ist durch seine Bauform und Positionierung festgelegt. Die Richtkurve zwischen Solarintensität und Solarwert ist jedoch als Applikationsparameter angelegt. Diese Kurve wurde allerdings als konstant angenommen und nicht den zu optimierenden Applikationsparametern zugeordnet.

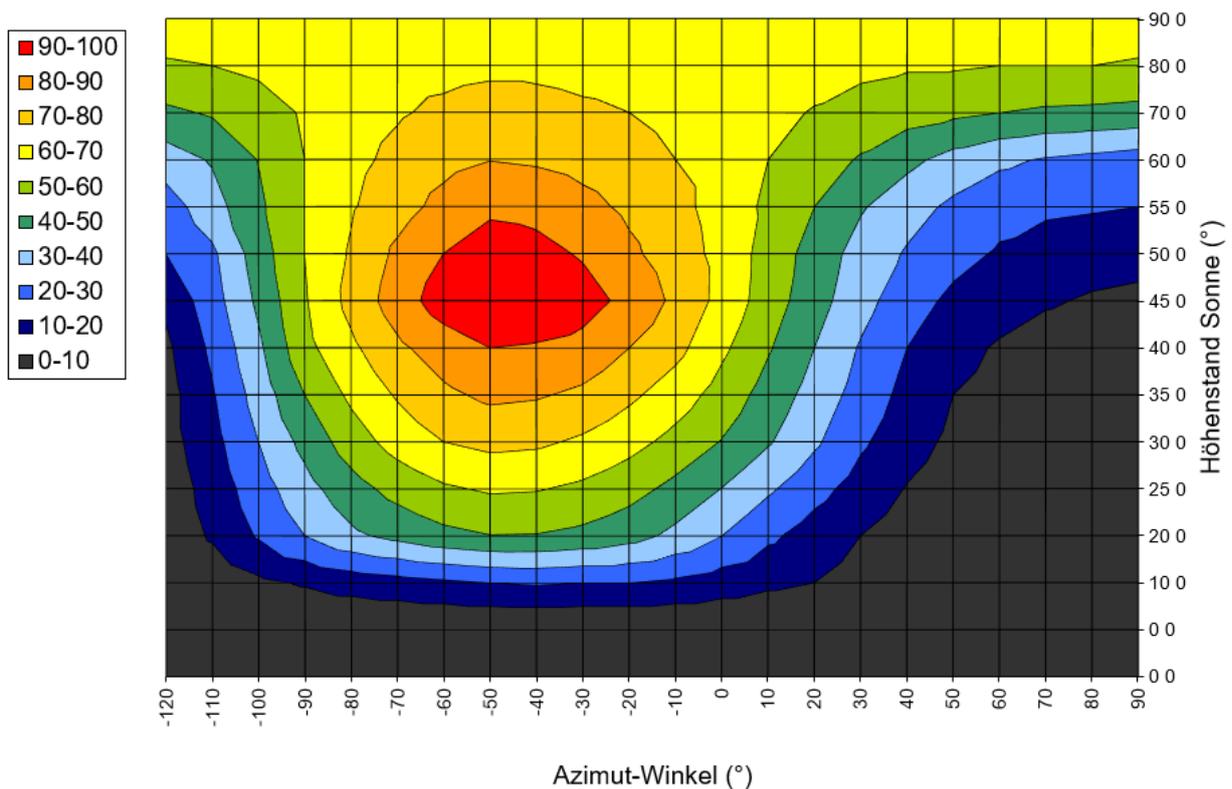


Abbildung 30. Ermessene Richtcharakteristik des Solarsensors der Fahrerseite

3.1.4 Regelung

Die Funktionslogik des Reglers wird modellbasiert entwickelt und es liegt daher ein exaktes Modell der Regelung vor. Dieses Modell ist jedoch für die Ausführung auf dem Steuergerät des Fahrzeugs bestimmt. Daher sind einige Anpassungen nötig. Im Rahmen dieser Anpassungen wurde eine Vielzahl von nicht relevanten Signalen entfernt, bzw. die Werte wurden als konstant angenommen statt eine Anfrage an andere Steuergeräte des Fahrzeugs zu starten. Zudem wurden für den Fahrbetrieb nicht essenzielle

Funktionen entfernt, um das Modell zu vereinfachen und übersichtlicher zu gestalten. Beispielsweise wurden die Funktionen für Standklimatisierung oder das Verhalten bei Fahrzeugstart entfernt. Darüber hinaus wurden die relevanten Eingangsgrößen als Eingangsvariablen definiert. Auf diese Art können alle relevanten Sensorgrößen an das Reglermodul übergeben werden.

3.1.5 Korrekturen

Während der Validierung der Klimagerät- und Innenraummodule wurden teilweise systematische Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und den Validierungsdaten festgestellt. Diese Abweichungen wurden anschließend durch zusätzliche, statische Offsets eliminiert, um die Ergebnisqualität zu verbessern.

Die Berechnung dieser Offsets basierte auf den durchschnittlichen Abweichungen aller Validierungsversuche und wurde jeweils bei der isolierten Betrachtung einzelner Module ermittelt. Die resultierenden Offsets waren im Bereich von ± 3 K. Durch die kleine Stichprobe an Validierungsfahrten beträgt die Unsicherheit bei der Berechnung der Offsets etwa 0,5 K

3.2 Zielfunktion

Um die Qualität einer Klimaregelung ganzheitlich charakterisieren zu können, muss die Qualität über den gesamten Betriebsbereich bewertet werden. Gleichzeitig muss die Wichtigkeit der einzelnen Betriebspunkte berücksichtigt werden. Um beide Bedingungen zu erfüllen, wird die Zielfunktion als ein gewichteter Durchschnitt über den gesamten Betriebsbereich berechnet.

Abbildung 31 zeigt den Ablauf zur Bestimmung der Zielfunktion. Für zahlreiche Betriebspunkte wird der jeweils erreichte Klimakomfort unter diesen Bedingungen ermittelt. Danach werden den Betriebspunkten Gewichte zugeordnet und aus der Kombination des erreichten Klimakomforts und der jeweiligen Gewichtung ein gewichteter Mittelwert ermittelt. Dieser Wert wird anschließend normalisiert und so in die Zielgröße der Optimierung überführt.

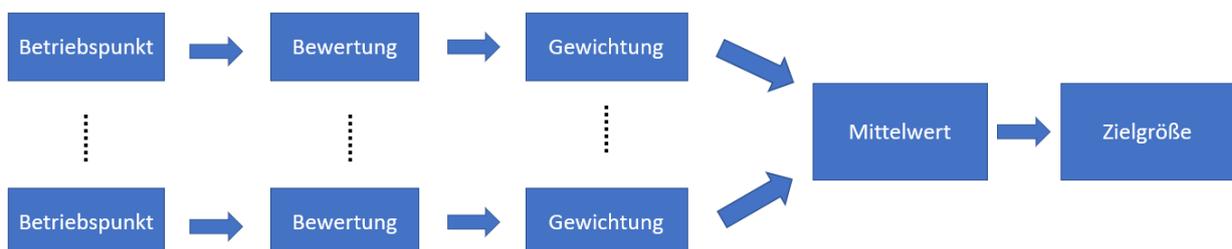


Abbildung 31. Schema zur Bewertung einer Klimaregelung

Für die Optimierungen wurden jeweils 59 Betriebspunkte betrachtet. Die Betriebspunkte wurden mithilfe eines raumfüllenden Versuchsplans ausgewählt, der wiederum auf der Sobol Sequenz basiert und den gesamten möglichen Betriebsbereich abdeckt.

3.2.1 Klimakomfort Modellierung

Das Nilsson Komfortmodell stellt eine gute Möglichkeit zur Bewertung der einzelnen Betriebspunkte dar, weil dieses Modell einfach zu berechnen ist, nur von wenigen Eingangsgrößen abhängt und gleichzeitig in der Lage ist die relevanten Umgebungsbedingungen zu bewerten. Außerdem ist dieses Modell wissenschaftlich anerkannt und auch in Normen standardisiert. Zudem ist es mit geeigneten Messpuppen einfach möglich, den erreichten Klimakomfort nach Nilsson im realen Fahrzeug zu messen.

Die benötigten Messpuppen zur Bestimmung der Äquivalenttemperaturen standen jedoch leider nicht rechtzeitig zur Verfügung. Da die Messung der Äquivalenttemperaturen im Fahrzeug nicht praktikabel durchführbar war, wurde eine andere Methode zur Bewertung des Klimakomforts verwendet. Diese Methode bezieht sich auf die Lufttemperaturen in Kopf- und Fußhöhe. Dies ermöglicht eine einfache Bestimmung des erreichten Wertes im Fahrbetrieb. Außerdem gibt es bereits zahlreiche Erfahrungen mit der Anwendung im Entwicklungsbetrieb und auch zur Bestimmung der Serienapplikation des Versuchsfahrzeugs wurde diese Metrik eingesetzt. Die Metrik berücksichtigt jedoch keinerlei Einfluss der Strahlung.

In dieser Metrik sind in Abhängigkeit von der Außentemperatur und den gewählten Einstellungen Maximal- und Minimalwerte für die Lufttemperatur in Kopf- und auf Fußhöhe definiert. Als Idealwert wird dabei der Mittelwert aus Maximal- und Minimalwert verwendet. Als Zielfunktion wird bei dieser Variante die mittlere absolute Abweichung der Lufttemperaturen von der idealen Temperatur verwendet. Aufgrund der hohen Unsicherheit in der Berechnung der Fußhöhentemperatur, wurden die Fußraumtemperaturen aus der Berechnung entfernt und lediglich die Werte für die Kopfhöhentemperatur berücksichtigt. Tabelle 8 listet die Grenzwerte für die Kopfhöhen und Fußhöhentemperatur für die Standardeinstellung von 22 °C auf.

Tabelle 8. Grenzwerte für Lufttemperaturen im Fahrzeug für die Einstellung 22 °C

Außentemperatur	Min. Kopfhöhe	Max. Kopfhöhe	Min. Fußhöhe	Max. Fußhöhe
-20 °C	27 °C	29 °C	30 °C	34 °C
-5 °C	26 °C	28 °C	28 °C	32 °C
10 °C	25 °C	27 °C	27 °C	31 °C
25 °C	23 °C	25 °C	25 °C	29 °C
40 °C	22 °C	24 °C	25 °C	29 °C
48 °C	22 °C	24 °C	25 °C	29 °C

In Abbildung 32 werden diese Temperaturbereiche grafisch dargestellt. Obwohl für die Berechnung der Zielfunktion lediglich die Kopfhöhen herangezogen werden, ist der Idealbereich für die Temperaturen in Fußhöhe ebenfalls abgebildet. Die farbige Linie repräsentiert den Mittelwert des jeweiligen Gebiets. Eindeutig sind die empfohlenen Lufttemperaturen im Fußraumbereich jeweils über denen im Kopfbereich. Außerdem reduzieren sich die empfohlenen Temperaturen mit steigender Außentemperatur. Bei extremen Außentemperaturen unter -20 °C oder über 40 °C verändern sich die Anforderungen nicht mehr.

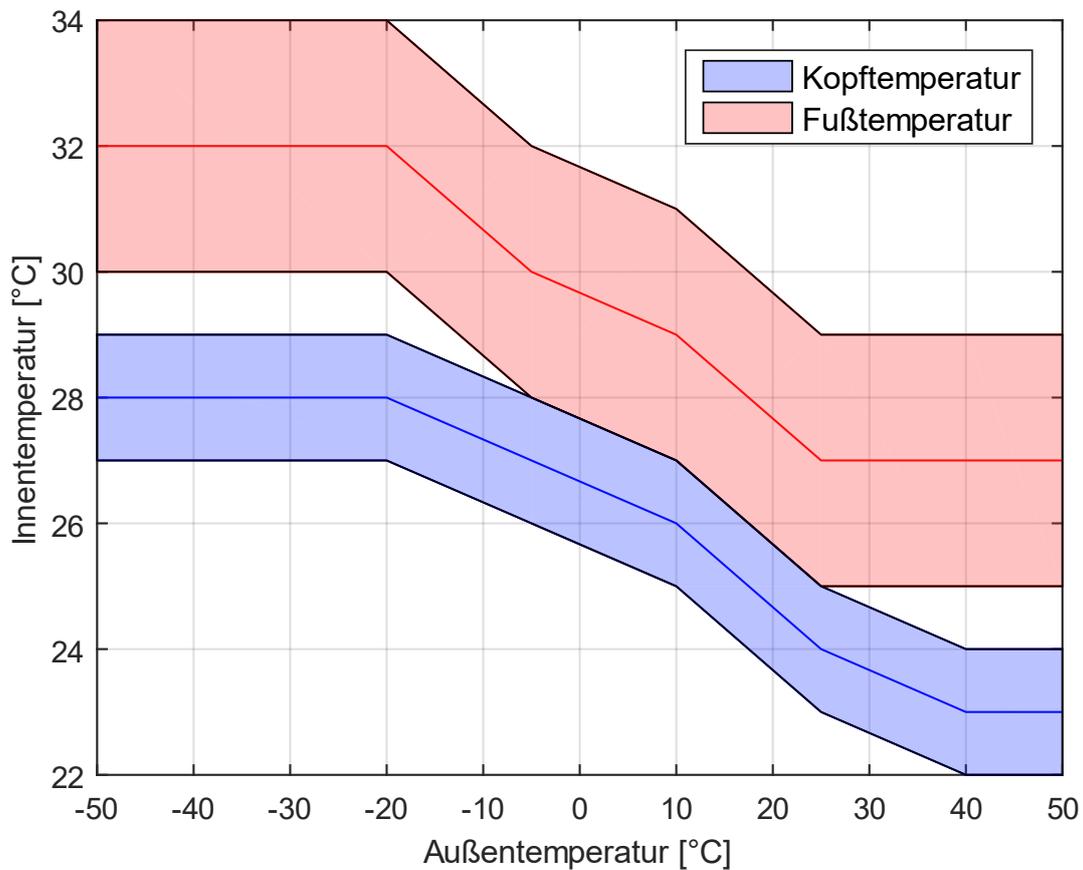


Abbildung 32. Visualisierung der zulässigen Temperaturbereiche für eine Einstellung von 22 °C

Zur Berechnung der Zielfunktion Z wird der Mittelwert der normalisierten Abweichung zwischen Isttemperatur auf der Fahrer- und Beifahrerseite T_{Fa} bzw. T_{Bf} und Idealtemperatur T_{ideal} verwendet. Dabei wird lediglich die Lufttemperatur in Kopfhöhe herangezogen. Zur Normalisierung wird die Abweichung vom Idealwert durch die Spannweite des vorgegebenen Bereichs geteilt. Diese Spannweite entspricht der Differenz aus der maximal erlaubten Temperatur $T_{ideal,max}$ und der minimal erlaubten Temperatur $T_{ideal,min}$. Die Werte der Zielfunktion sind einheitslos.

$$Z = \frac{|T_{Fa} - T_{ideal}|}{(T_{ideal,max} - T_{ideal,min})} + \frac{|T_{Bf} - T_{ideal}|}{(T_{ideal,max} - T_{ideal,min})} \quad (13)$$

3.2.2 Auswahl der Betriebspunkte

Die Stichprobe der Betriebspunkte repräsentiert einen raumfüllenden Versuchsplan und wird mittels der Sobolfolge bestimmt. Ein Betriebspunkt ist durch sechs unabhängige Merkmale charakterisiert:

- Außentemperatur
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Tageszeit
- Bewölkung
- Fahrtrichtung
- Relative Luftfeuchtigkeit

Es wird ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und dem Datum angenommen. Außerdem wird eine konstante Positionierung des Fahrzeugs in München angenommen. Durch diese Annahmen lassen sich die relevanten Größen über die Sonnenposition und Intensität ableiten ohne zusätzliche Designvariablen zu benötigen. Durch diese Aufteilung können mit einer minimalen Anzahl an unabhängigen Variablen alle relevanten Betriebspunkte abgebildet werden. Gleichzeitig wird die Untersuchung von unplausiblen Betriebspunkten verhindert. Insgesamt wurden 59 verschiedene Betriebspunkte berücksichtigt.

3.2.3 Gewichtung der Betriebspunkte

Die Gewichtung der einzelnen Betriebspunkte richtet sich nach der Anzahl der Autofahrten, die unter vergleichbaren klimatischen Bedingungen in Europa stattfinden. Die Nutzungsdaten stammen aus der Arbeit von Strupp *et al.* [69]. In dieser Arbeit sind die klimatischen Bedingungen nach der Solarintensität, der Außentemperatur und der relativen Feuchtigkeit in Kategorien eingeteilt. Zu jeder Kategorie ist außerdem die relative Anzahl der Autofahrten, die unter diesen Bedingungen stattfanden, angegeben.

Die simulierten Betriebspunkte werden entsprechend der drei Kriterien in die Kategorien der Nutzungsdaten eingeordnet und die entsprechende relative Häufigkeit wird dem Betriebspunkt zugeordnet. Jedem Betriebspunkt wurde eine minimale Gewichtung von 20 % zugeordnet. Dies soll verhindern, dass seltene Betriebspunkte im Optimierungsprozess ignoriert werden. Im letzten Schritt werden die relativen Häufigkeiten normiert, sodass die Summe der relativen Häufigkeiten der Betriebspunkte 100 % entspricht.

3.3 Optimierung

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie die Optimierung durchgeführt wurde und welche Einstellungen verwendet wurden. Es stellte sich schnell heraus, dass gradientenbasierte Algorithmen durch die Unstetigkeit des Reglerverhaltens nur bedingt für das Optimierungsproblem geeignet sind. Dies wurde durch eine Untersuchung des Gütegebirges und erste Versuche mit diesen

Optimierungsalgorithmen bestätigt. Daher wurden hauptsächlich die Möglichkeiten genetischer Optimierungsalgorithmen untersucht. Dabei wurde auf bereits bestehende Funktionen in Matlab zurückgegriffen.

Die Überlegung wird von einer beispielhaften Untersuchung des Gütegebirges bestätigt. Dieses lokal untersuchte Gütegebirge für zwei Designvariablen wird in Abbildung 33 dargestellt. Trotz der recht groben Abtastrate lassen sich bereits zahlreiche lokale Minima erkennen. Diese lokalen Minima erschweren die Optimierung mittels gradientenbasierter Algorithmen.

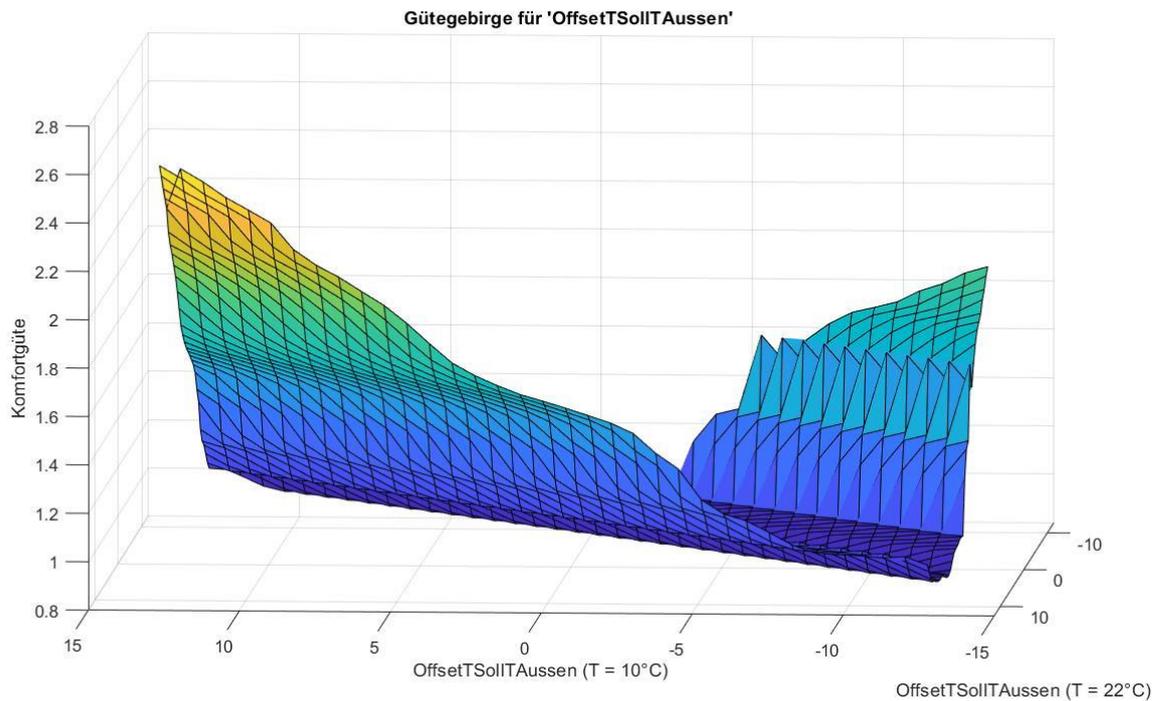


Abbildung 33. Lokales Gütegebirge für zwei Designvariablen

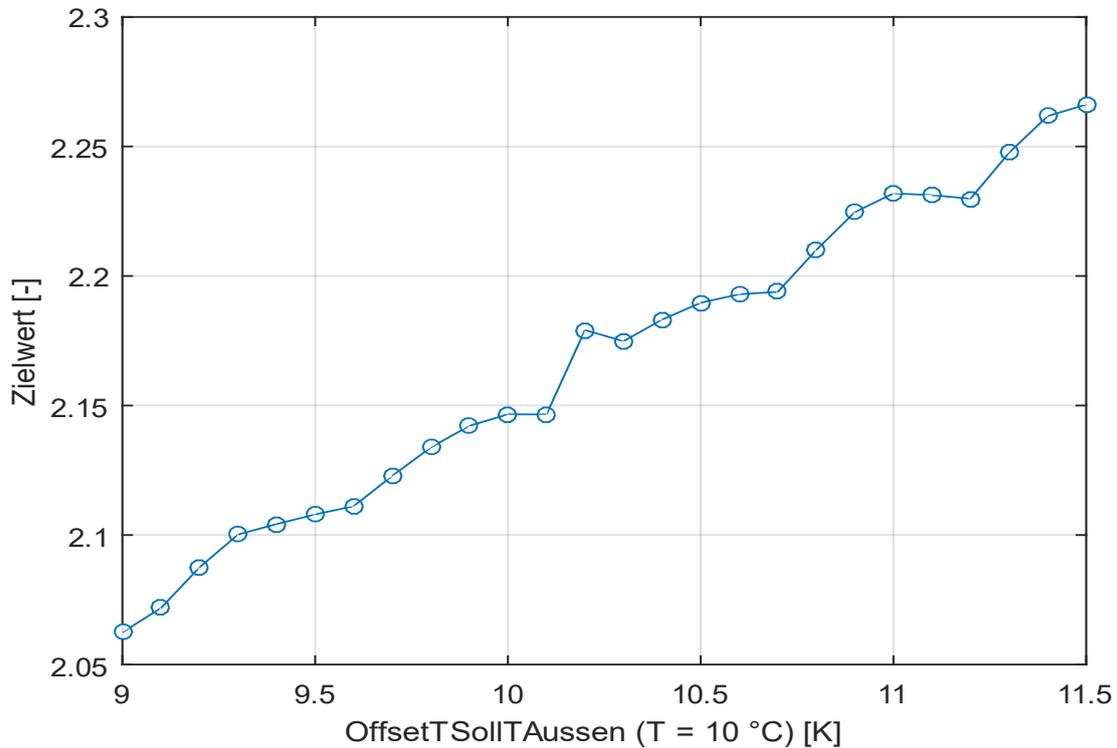


Abbildung 34. Lokale Gütefunktion mit minimaler Schrittgröße

Abbildung 34 zeigt einen kleinen Ausschnitt des Gütegebirges, welches bereits in Abbildung 33 dargestellt wird. In diesem Fall wurde jedoch die Schrittweite auf den minimal zulässigen Wert von 0,1 verringert und es wird lediglich eine Achse betrachtet. Trotz des sehr stark ausgeprägten Trends in der Gütefunktion, existieren bereits in diesem kleinen Ausschnitt der Gütefunktion drei lokale Minima. Diese lokalen Minima entstehen durch Probleme in der Konvergenz der Simulationsergebnisse und die verwendeten Abbruchkriterien. Außerdem spielen Rundungsvorgänge sowie Hysteresen in der Funktionslogik des Reglers eine Rolle.

3.3.1 Auswahl der Applikationsparameter

Zur Durchführung der modellbasierten Applikation wurden drei Sets von Applikationsparametern erzeugt. Diese Sets werden in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9. Übersicht der untersuchten Sets von Applikationsparametern

Name	Set 1	Set 2	Set 3
Beschreibung	Einzelner Parameter Zentrale Stellgröße	Zentrale Stellgröße und Schichtungseffekt	Möglichkeit zur vollständigen Einstellung des Innenraumklimas im statischen Fall

Zum besseren Verständnis der Funktion der ausgewählten Applikationsparameter wird in Abbildung 35 der relevante Teil des Reglers in vereinfachter Form dargestellt. Der gezeigte Ausschnitt beschränkt sich auf die Bestimmung von Sollwerten für die Innenraumtemperatur und die Ausblastemperaturen der Fußebene sowie Belüftungsebene. Dieser Ausschnitt stellt lediglich einen kleinen Teil der Reglerlogik dar und ist stark vereinfacht. Graue Rechtecke repräsentieren die jeweiligen Signale und die blauen Kreise repräsentieren Applikationsparameter. Die roten Ziffern neben den Applikationsparametern geben an, für welches Set die Parameter in die Optimierung eingeschlossen wurden.

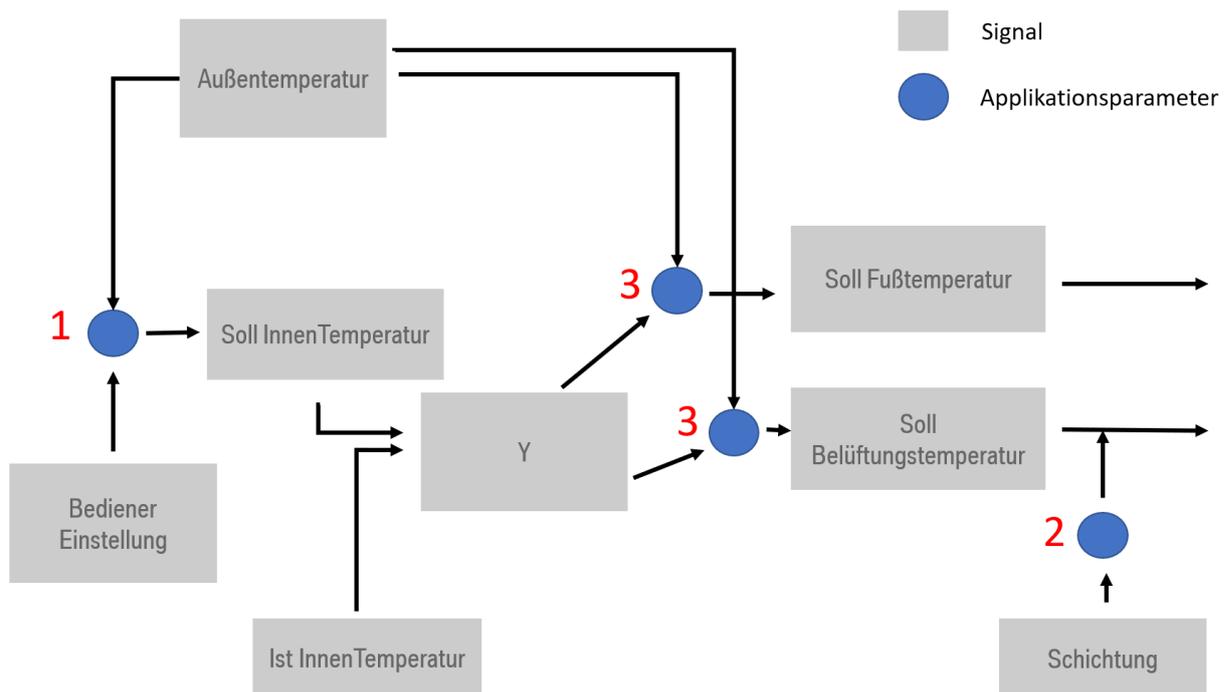


Abbildung 35. Vereinfachter Ausschnitt der Reglerkaskade

Der Ausgangspunkt der Regelung ist die Temperatureinstellung des Bediener. Diese kann von 16 bis 28 reichen und ist einheitslos. Abhängig von der jeweiligen Außentemperatur wird dieser Eingabewert in eine Innenraumsolltemperatur in °C berechnet. Ausgehend von der Differenz zwischen Solltemperatur und der gemessenen Innenraumtemperatur wird die Hauptstellgröße Y berechnet. Diese kann von -100 (maximal kühlen) bis +100 (maximal heizen) reichen. Y wiederum wird zusammen mit der Außentemperatur genutzt, um mittels zweier Kennfelder die Sollwerte für die Ausblastemperatur der Belüftungsebene und der Fußebene zu bestimmen. Der so berechnete Wert für die Belüftungstemperatur wird mit einem Offset für die Schichtungseinstellung versehen, bevor im weiteren Verlauf die Einhaltung des Sollwertes sichergestellt wird. Der Sollwert der Fußebene wird durch die Schichtungseinstellung nicht korrigiert.

Set 1 ist das Minimalbeispiel. In diesem Set wird nur eine einzige Kennlinie optimiert. Diese Kennlinie bestimmt die Verschiebung des Sollwertes für die Innenraumtemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Der Grund für die Auswahl ist der große Einfluss, den diese Kennlinie auf das Verhalten der Klimaregelung hat. Außerdem ist dieser Parameter unter allen Betriebsbedingungen aktiv.

In Set 2 wird zusätzlich zu Set 1 eine Kennlinie zur Festlegung des Schichtungsoffsets optimiert. Die gewünschte Schichtung ist eine zusätzliche Stellvariable für den Bediener und bestimmt den Temperaturunterschied zwischen Fußebene und Belüftungsebene. Die Einstellmöglichkeit reicht von 0 (warme Füße) bis 100 (kalte Füße). Eine Einstellung von 50 repräsentiert den neutralen Stand. Diese Einstellung wurde für die Optimierung verwendet. Die Kennlinie für den Schichtungsoffset überführt die jeweilige Schichtungseinstellung in einen Temperaturunterschied in der Solltemperatur. Da lediglich die Einstellung 50 in den Simulationen verwendet wurde, vereinfacht sich die Optimierung der Schichtungsoffset Kennlinie zu einem einzelnen Stützpunkt. Die übrigen Stützpunkte der Kennlinie haben lediglich einen Einfluss auf die Regelung, wenn die Einstellung vom Wert 50 abweicht, was in der Optimierung ausgeschlossen ist.

Set 3 vereint die wichtigsten Applikationsparameter zur Sicherstellung des thermischen Komforts. In diesem Set werden zwei Kennfelder und zwei Kennlinien optimiert. Zusätzlich zu den Applikationsparametern aus Set 2 werden zwei Kennfelder für die Belüftungs- und Fußsolltemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur sowie der Hauptstellgröße Y optimiert. Mit diesen vier Parametern lässt sich ein Großteil des Verhaltens in statischen Betriebspunkten bestimmen. Außerdem ist in diesem Set an Applikationsparametern bereits eine Redundanz enthalten. Der Einfluss des Schichtungsoffsets kann vollständig durch das Kennfeld für die Belüftungssolltemperatur kompensiert werden.

3.3.2 Format der Applikationsparameter

Kennfelder und Kennlinien werden durch die Koordinaten ihrer Stützpunkte ausgedrückt. Zwischen den Stützpunkten findet eine lineare Interpolation statt, um die exakten Werte zu berechnen. Um die Anzahl der zu optimierenden Variablen zu minimieren, wurde jeweils nur eine Dimension variiert und die jeweils anderen Dimensionen konstant belassen. Dieses Verfahren wird üblicherweise auch im konventionellen Applikationsprozess angewendet. Nur in Ausnahmefällen werden die Stützpunkte in mehr als einer Dimension variiert.

Zusätzlich zu dieser Maßnahme werden die Einflüsse der Nutzereingaben auf die Parameter entfernt. Auf diese Weise können Kennfelder zu Kennlinien reduziert werden und Kennlinien zu einfachen Parametern. Dies verringert die Anzahl der Designvariablen. Da die Optimierungen jeweils nur für eine Kombination von Benutzereingaben durchgeführt werden, hat diese Maßnahme keine Auswirkungen auf die Aussagekraft der Ergebnisse. Sollten in späteren Schritten jedoch auch Applikationen für den gesamten Eingabebereich erzeugt werden, entfällt diese Möglichkeit zur Vereinfachung des Optimierungsproblems.

3.3.3 Optimierungshyperparameter

Das Verhalten eines evolutionären Optimierungsalgorithmus wird von einer Vielzahl von Parametern bestimmt. Diese Parameter werden Hyperparameter genannt. In einem iterativen Prozess wurden die verwendeten Werte für die Hyperparameter bestimmt. Die Werte für die wichtigsten Hyperparameter

werden in Tabelle 10 aufgelistet. Die Parameter sind für den Einsatz mit einem evolutionären Optimierungsalgorithmus bestimmt.

Tabelle 10. Verwendete Werte für die Hyperparameter

Parameter	Einfluss	Verwendete Werte
Populationsgröße	Anzahl der Individuen in einer Generation	75
Maximale Anzahl Iterationen	Abbruchkriterium	2500
Maximale Berechnungszeit	Abbruchkriterium	450000 s
Stall Generation Limit	Abbruchkriterium: Nach X Generationen ohne Verbesserung der Fitness wird die Optimierung abgebrochen	6
Elite Anzahl	Anzahl der Eliten, die in die nächste Generation übernommen werden	7
Rekombinationsrate	Anteil der Individuen die durch Rekombination entstehen	0.7

Für gradientenbasierte Algorithmen sind jeweils andere Parameter entscheidend und einige der vorgestellten Hyperparameter sind nicht anwendbar.

3.4 Applikationsumgebung und Modellbildung

Zur Bearbeitung der unterschiedlichen Applikationsaufgaben wurde eine Applikationsumgebung entwickelt. Diese basiert auf einer grafischen Benutzeroberfläche und erlaubt es Skripte zur Bewältigung der wichtigsten Simulationsaufgaben zu erstellen. Dabei werden jeweils auch automatisch die gewünschten Modelle erstellt. Abbildung 36 zeigt die Bedienoberfläche der Applikationsumgebung.

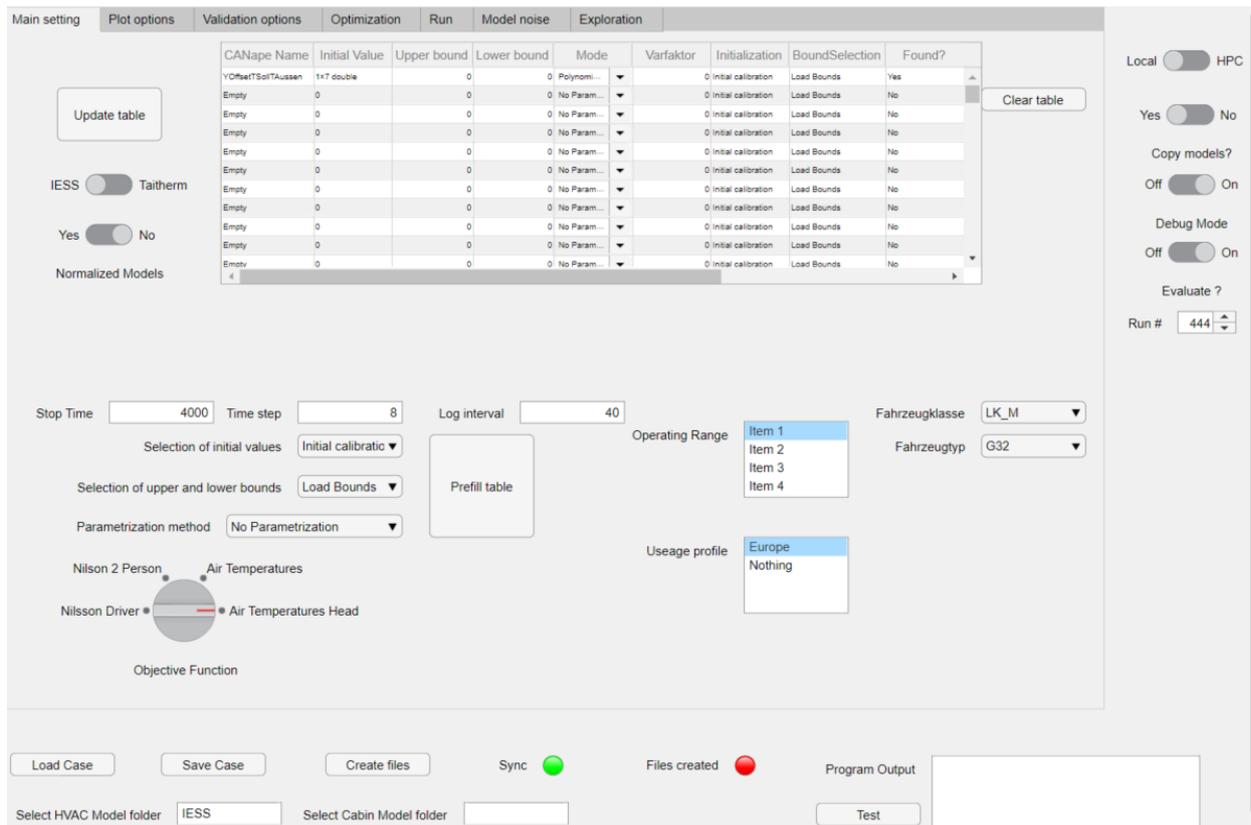


Abbildung 36. Bedienoberfläche der Applikationsumgebung

Zu den wichtigsten Funktionen gehören das Festlegen der zu optimierenden Applikationsparameter, sowie das Festlegen der Simulationseinstellungen wie betrachteter Zeitraum, Zielfunktion oder die Modellarten und eventuelle Veränderungen der Modelle. Außerdem sind spezielle Funktionen für die Optimierung oder die Validierung der Modelle implementiert.

Das Tool wurde wie auch die Simulationsumgebung selbst in Matlab entwickelt. Sobald die gewünschten Einstellungen ausgewählt wurden, können per Knopfdruck die entsprechenden Skripte zur Ausführung der Optimierung erzeugt und revisionssicher mit den benötigten Dateien in einen neuen Ordner geschrieben werden. Dabei werden auch die jeweils passenden Black-Box Modelle aus einer Bibliothek ausgewählt und kopiert. Außerdem wird ein Simulink-Modell erstellt und die benötigten Funktionsblöcke in der richtigen Reihenfolge miteinander verbunden und so das Gesamtmodell erstellt. Auf das erzeugte Modell angepasste Skripte zur Auswertung der Ergebnisse und zum Exportieren der Ergebnisse auf das Steuergerät des Fahrzeugs werden ebenfalls erzeugt. Von dem Ordner aus können die Optimierungen lokal oder auf einem High Performance Computing (HPC) Cluster mit bis zu 120 Kernen durchgeführt werden.

Die Einführung der Applikationsumgebung hat den Arbeitsaufwand und die Fehleranfälligkeit durch die Automatisierung deutlich reduziert. Während der Untersuchungen dieser Arbeit wurde die Applikationsumgebung beständig weiterentwickelt und wird auch weiterhin gepflegt und erweitert. Die

Applikationsumgebung bildet dabei die Grundlage für etwaige weiterführende Untersuchungen und Entwicklungen. Auch Skripte zur Validierung der Teil- und Gesamtmodelle wurden mithilfe der Applikationsumgebung erzeugt.

4 Validierung der Modelle

Eine Validierung der Modelle ist notwendig, um die Genauigkeit der Modelle zu bestimmen und Rückschlüsse auf Verbesserungsmöglichkeiten ziehen zu können. Die Genauigkeit ist notwendig, um den Ursprung etwaiger Probleme in der Optimierung nachvollziehen zu können. Das Vorgehen zur Validierung der Modelle und die erzielten Ergebnisse werden in diesem Kapitel vorgestellt.

Die Modelle werden in verschiedenen Komplexitätsgraden miteinander kombiniert. Die Komplexität der resultierenden Gesamtmodelle wird dabei schrittweise erhöht. Zunächst werden die einzelnen Module separat validiert. Danach werden zwei mögliche Paare von Modulen zusammen validiert. Dies sind die Paare Regler-Klimagerät und Klimagerät-Innenraum. Im letzten Schritt wird das Gesamtmodell bestehend aus den drei Modulen validiert. Für das Innenraummodul werden jeweils beide verfügbaren Varianten verwendet. Auf diese Weise ist es möglich den Einfluss und die Interaktion der Fehler der einzelnen Module zu verstehen.

Die einzelnen Modelle werden dabei jeweils mit den gemessenen Daten aus Validierungsfahrten verglichen. Für die Validierung wurden die aufgezeichneten Daten aus 16 Validierungsfahrten verwendet. Dabei wird jeweils auf Versuche unter kontrollierten Außenbedingungen sowie auf Ergebnisse aus Straßenerprobungen zurückgegriffen. Wo es sinnvoll war, wurden auch künstliche Testfälle erzeugt, um die Grenzen der Module unter Extrembedingungen zu untersuchen. In den Fällen mit Teilmodellen, werden die verfügbaren Eingangswerte der Module berechnet. Wo dies nicht möglich ist, werden die Eingangsvariablen aus den Messdaten geladen.

Die Messtechnik zur Erfassung der Lufttemperaturen im Fußraum war allerdings nur in neun dieser Fahrten eingebaut. Um einen Überblick über die Bandbreite zu geben, werden für die verschiedenen Fälle jeweils unterschiedliche Versuchsfahrten analysiert. Zur Bestimmung der Standardabweichung wurde jedoch immer das gesamte relevante Validierungsset verwendet.

4.1 Einzelmodule

Im ersten Schritt werden die Module isoliert betrachtet. Die Eingänge in das jeweilige Modul werden aus den Aufzeichnungen geladen. Die jeweilige Reaktion wird mit den aufgezeichneten Daten verglichen. Dies geschieht für die drei Hauptmodule, Regler, Klimagerät und Innenraum.

4.1.1 Regler

Obwohl das Reglermodul von der Funktionslogik, welche in der Reglerentwicklung verwendet wird, abgeleitet wurde, können auch hier Modellierungsfehler auftreten. Daher muss auch dieses Modul validiert werden, um die Qualität des Modells sicherzustellen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Validierungsfahrten mit dem Fahrzeug durchgeführt. Während dieser Fahrten wurden alle

Eingangssignale der Sensoren sowie die relevanten Ausgangssignale und ausgewählte reglerinterne Zwischengrößen aufgezeichnet.

In einer Simulation wurden danach die aufgezeichneten Sensorgrößen in das Reglermodul gegeben und die Ausgangssignale mithilfe des Modells berechnet. Daraufhin wurden die Ausgangsgrößen sowie die Zwischengrößen mit den entsprechenden gemessenen Werten verglichen. Abbildung 37 zeigt diesen Vergleich für die Position der vorderen Mischluftklappe auf der Fahrerseite für eine dieser Validierungsfahrten.

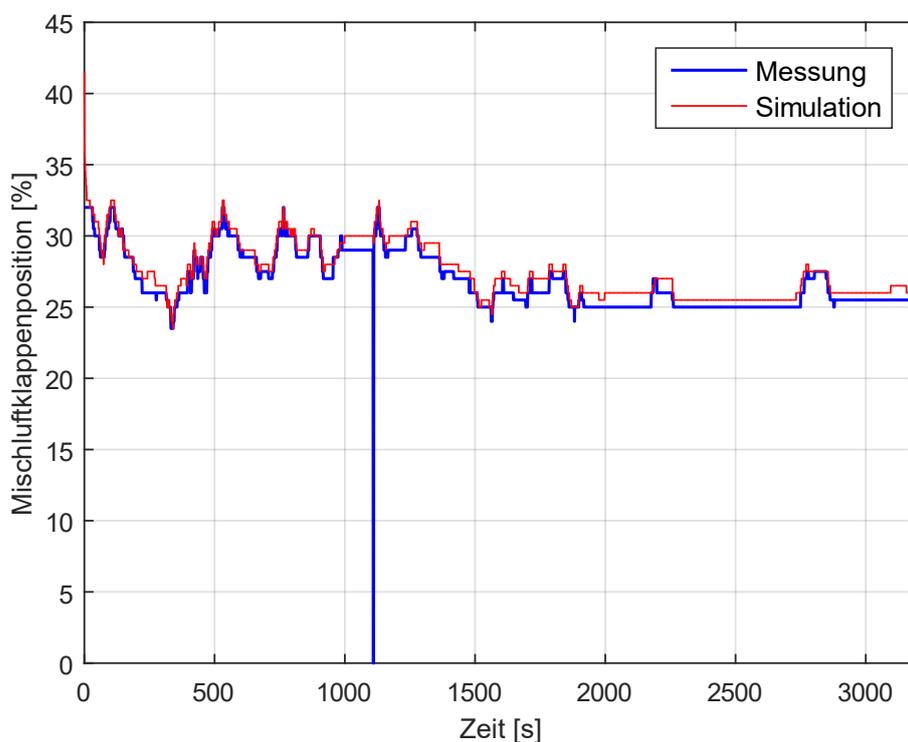


Abbildung 37. Validierung des Reglermoduls für die Ansteuerung der vorderen Mischluftklappe für die Fahrerseite

Nach etwa 1100 Sekunden ist ein kurzzeitiger, starker Abfall der gemessenen Klappensollposition erkennbar. Dieses Verhalten wird vom Modell nicht abgebildet. Dies lässt sich durch den eingeschränkten Funktionsumfang des Modells erklären. Zu diesem Zeitpunkt hat sich der Motor durch die Start-Stopp Automatik an einer roten Ampel abgeschaltet. Dieser Vorgang hat in der Regelung im Fahrzeug eine spezielle Funktion ausgelöst, die die Mischluftklappen auf 0 % fährt. Nachdem der Motor wieder gestartet wurde, wurde der normale Betrieb wiederhergestellt. Diese Funktion ist im Reglermodul nicht implementiert. Daher wird das Event des Motorstopps ignoriert. Dies zeigt, dass das Reglermodul und daher auch das Gesamtmodell nur für die ausgewählten, relevanten Fahrsituationen gültig sind.

Bis auf diese kurze Ausnahme sind die Abweichungen zwischen den im Fahrzeug gemessenen Werten und der Simulation sehr gering. Die maximale Abweichung beträgt 2 %. Eine solche Variation der

Stellgröße hat im Fahrbetrieb keine Auswirkungen, da sie die Genauigkeit der verwendeten Schrittmotoren übersteigt. Die vorhandenen Abweichungen lassen sich teilweise mit Unterschieden in der verwendeten Rechengenauigkeit und im Rundungsverhalten erklären. Außerdem ist die Initialisierung des Modells nicht identisch mit den initialen Werten im Steuergerät des Fahrzeugs. Dieser Effekt tritt in integrierenden Reglerkomponenten auf und entsteht, da die Aufzeichnung der Messdaten erst kurze Zeit nach dem Beginn der Messfahrt stattfindet. Wegen der geringen Abweichung wurden keine weiteren Versuche unternommen, um die Ursache der Abweichungen näher zu untersuchen.

Die Vergleiche anderer Ausgangssignale und anderer Validierungsfahrten ergaben ähnliche Ergebnisse. Daher wird der Fehlereinfluss des Reglermoduls als vernachlässigbar angenommen.

4.1.2 Klimagerät

Zur Validierung des Klimagerätemoduls wurden jeweils die Aktuatorpositionen aus den Messergebnissen ausgelesen und vorgegeben. Die simulierten Ausblastemperaturen wurden dann mit den gemessenen verglichen. Für die Massenströme konnten keine Werte während der Validierungsfahrten gemessen werden. Daher wurden lediglich die Ausblastemperaturen validiert. Hier sind exemplarisch zwei Validierungsfälle aufgeführt. Bei diesen Validierungsfällen handelt es sich um eine künstlich erzeugte Situation und eine Straßenerprobung, die dem alltäglichen Nutzungsprofil entspricht. Außerdem werden die Ergebnisse für einen Standardversuch mit den Messdaten des Herstellers verglichen.

Der erste Fall stellt einen artifiziellen Fall dar. Im Versuch wurden alle Aktuatoren konstant angesteuert und es wurde auf einen Beharrungszustand der Ausblastemperaturen gewartet. Sobald dieser erreicht war, wurde die Mischluftklappenposition sprunghaft erhöht und für etwa sechs Minuten auf dem erhöhten Wert belassen. Danach wurde der Ursprungswert wiederhergestellt und die Reaktion beobachtet. Abbildung 38 vergleicht den transienten Verlauf der Simulation und der entsprechenden Messergebnisse. Zusätzlich sind die jeweils berechneten Gleichgewichtswerte vor und nach der Korrektur durch die Korrekturmodelle abgebildet.

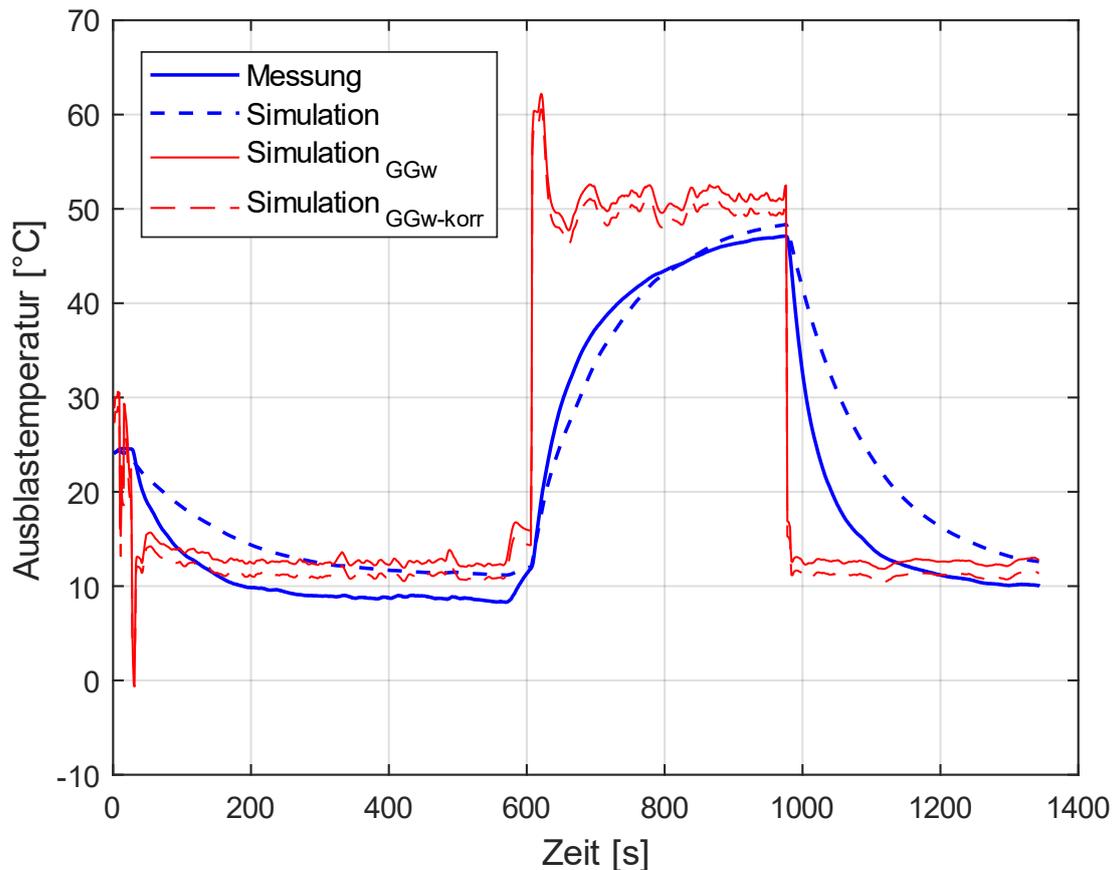


Abbildung 38. Vergleich der Ausblastemperatur und der vorhergesagten Gleichgewichtswerte

Die Abweichung beträgt in der anfänglichen Phase etwa 1,5 K. Der Temperatursprung nach dem Umstellen der Mischluftklappe nach etwa 600 s wird gut abgebildet. Die Simulation reagiert jedoch etwas träger als die Messung. Daher erhöht sich die Abweichung auf ein Maximum von etwa 5 K, verringert sich danach jedoch wieder und beträgt zum Ende der Phase etwa 1 K. Die berechneten Gleichgewichtswerte legen den Schluss nahe, dass sich die Abweichung bei längerer Beobachtung weiter reduziert hätte. Nach dem Wiederherstellen der ursprünglichen Klappenposition reagiert die simulierte Temperatur erneut langsamer als im Experiment. Im fallenden Verlauf erreicht die Abweichung einen maximalen Wert von über 10 K. Die Abweichung geht bis zum Ende der Messung jedoch wieder auf einen Wert von etwa 1,5 K zurück. Die berechnete Gleichgewichtstemperatur lässt eine weitere Verringerung der Abweichung vermuten.

Zu Beginn der Simulation ist ein kurzfristiger Abfall des errechneten Gleichgewichtswertes für die Ausblastemperatur in den negativen Bereich sichtbar. Dieser Abfall wird durch die Korrekturmodelle auf 3 °C begrenzt. Dies zeigt die Wirksamkeit der Filter. Die Spitze des Graphs befindet sich in dem Bereich, in dem die Klappen in die Ausgangsposition verfahren werden. Zu diesem Zeitpunkt ergeben sich sehr ungewöhnliche Klappenpositionen und kurzfristig war das Gebläse ausgeschaltet. Dies führt zu den

extremen Ausschlägen der Black-Box Modelle. Die Auswirkung auf den transienten Verlauf ist jedoch minimal.

Die Korrektur durch die Korrekturmodelle wird hauptsächlich durch die Außentemperatur bestimmt und schwankt während des Experiments zwischen 1 K und 2 K. Obwohl die Aktuatoren konstant angesteuert wurden, lassen sich kleinere Fluktuationen in den vorhergesagten Gleichgewichtstemperaturen erkennen. Diese Fluktuationen werden durch die schwankende Verdampfer Temperatur erklärt. Obwohl eine konstante Verdampfersolltemperatur vorgegeben wurde, wurden die tatsächlich gemessenen Verdampfer Temperaturen als Eingangsgröße für das Modell verwendet. Wegen der nicht idealen Regelung des Kältekreislaufs, schwankt die gemessene Temperatur um den Sollwert. Die starken Ausschläge kurz nach den Änderungen der Aktuatorpositionen lassen sich ebenfalls durch dieses Phänomen erklären. Durch das Verfahren der Klappen ändert sich kurzfristig der Druckwiderstand und damit auch der Massenstrom durch das Klimagerät. Dies ändert die Last, die am Verdampfer anliegt und induziert Schwingungen in den Kältekreislauf. Im transienten Verlauf der Ausblastemperatur können diese Schwankungen in den errechneten Gleichgewichtstemperaturen jedoch nicht identifiziert werden.

Straßenerprobung

Der zweite Validierungsfall ist eine Fahrt unter realistischen Bedingungen. Die gesamte Fahrt dauerte etwa 50 Minuten und setzt sich aus etwa 20 Minuten Fahrt auf der Autobahn gefolgt von etwa 30 Minuten im dichten Stadtverkehr zusammen. Die Fahrt fand an einem Tag mit leichter Bewölkung und einer Außentemperatur im Bereich von 15 °C bis 19 °C statt. Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Daten für die Belüftungstemperatur auf der Fahrerseite.

Vor Beginn der Fahrt stand das Fahrzeug für längere Zeit in der Sonne. Die Lufttemperatur im Innenraum betrug zu Beginn der Fahrt über 30 °C. Um den Innenraum abzukühlen ist die Ausblastemperatur anfangs sehr niedrig und erhöht sich im Laufe der Fahrt stetig. Nach etwa 30 Minuten hat sich die Innenraumtemperatur dem Sollwert angenähert. Daher ändert sich auch die Ausblastemperatur nicht mehr, da die Regelung versucht diesen Beharrungszustand aufrecht zu erhalten.

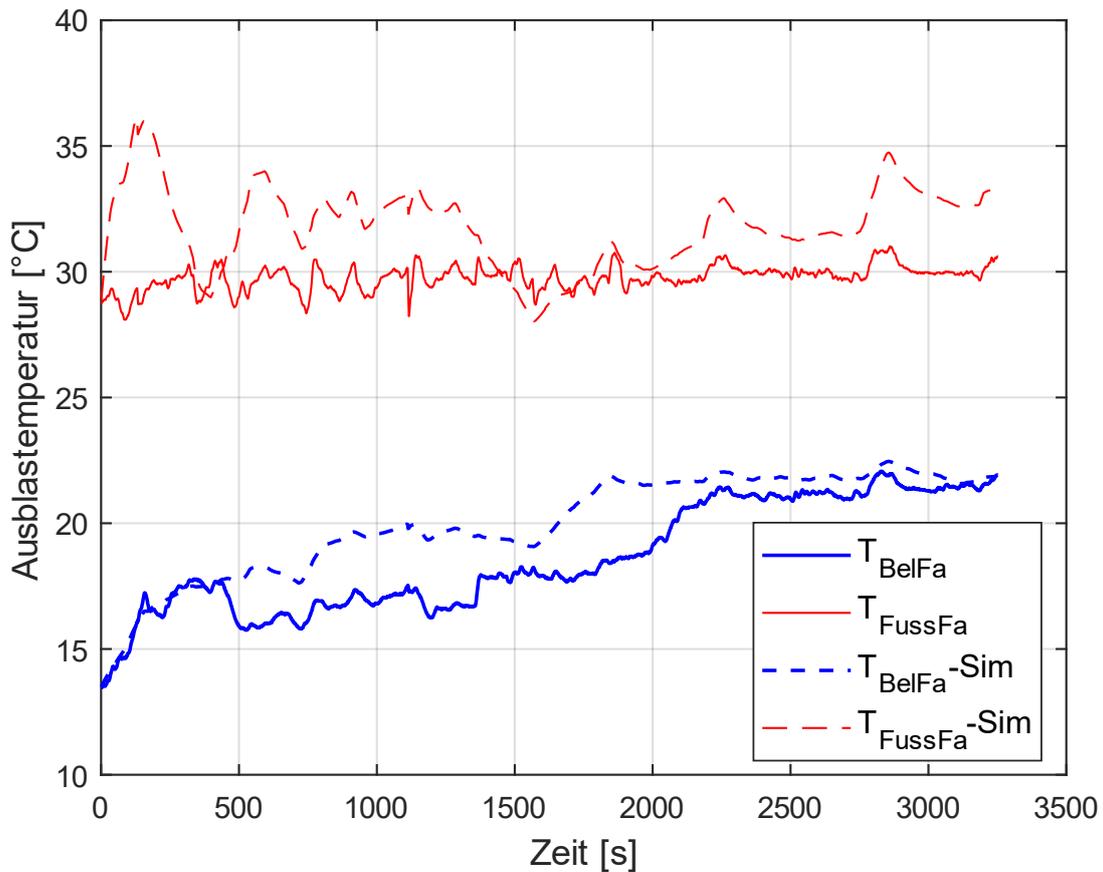


Abbildung 39. Vergleich der Ausblastemperatur für eine Validierungsfahrt

Die Simulation stellt den Verlauf der gemessenen Temperaturen gut nach. Die Abweichung beträgt über die letzten 20 Minuten des Versuchs weniger als 2 K. Lediglich beim Fußkanal der Fahrerseite sind größere Abweichungen in diesem Zeitraum zu beobachten.

Abbildung 40 zeigt die Abweichung zwischen den simulierten und gemessenen Werten der Ausblastemperaturen für dieselbe Fahrt. Die maximale Abweichung beträgt etwa 5 K und tritt nach etwa 300 Sekunden auf. Im weiteren Verlauf der Fahrt verringert sich die Abweichung für alle beobachteten Temperaturen. Ab etwa 2000 Sekunden erreichen die gemessenen Temperaturen einen quasistatischen Zustand. Für diesen Bereich befinden sich alle Abweichungen in einem Bereich von ± 1 K. Die Abweichung der Ausblastemperatur am Fußkanal der Fahrerseite ist etwas größer und befindet sich im Bereich von -2 K bis -3 K. Dieser Kanal wird etwas zu warm vorhergesagt.

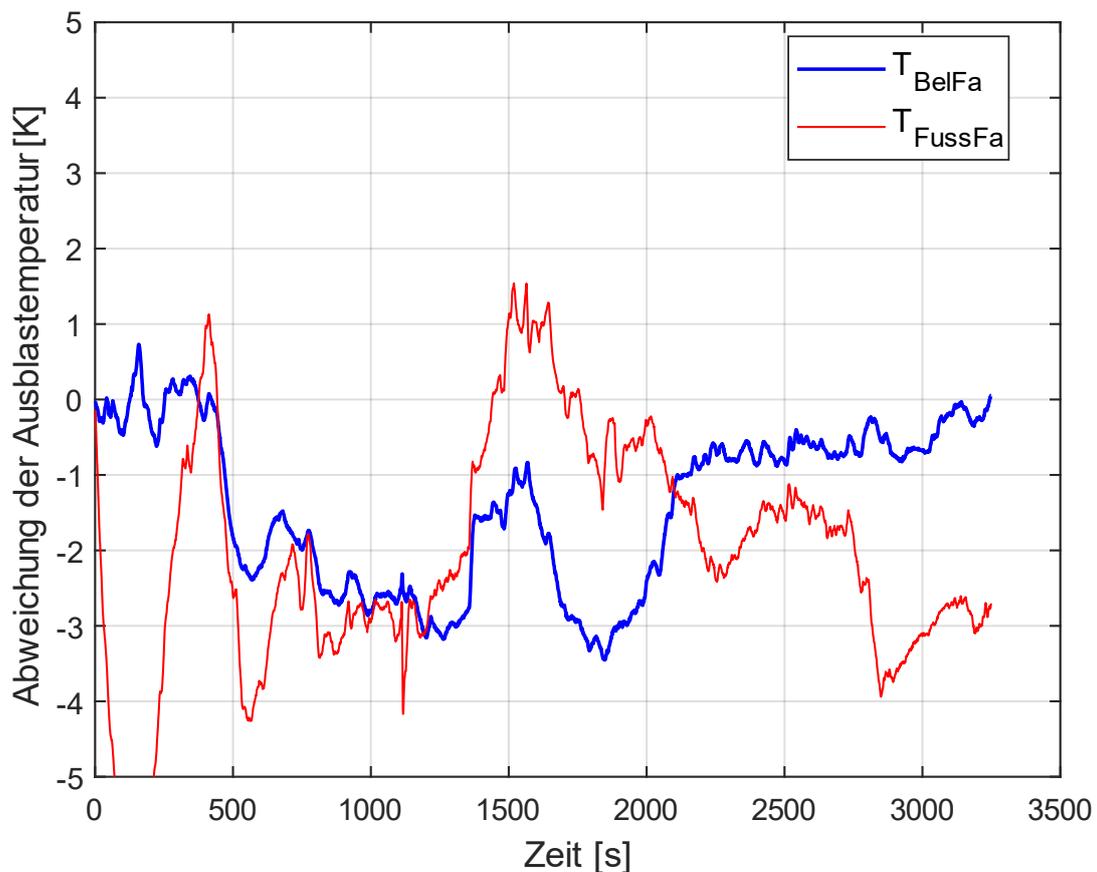


Abbildung 40. Abweichung ausgewählter Ausblastemperaturen im Laufe der Zeit

Vergleich zu Herstellerangaben

Für ausgewählte Betriebspunkte des Klimagerätes sind Informationen über die Ausblastemperaturen aus Herstellerversuchen bekannt. Eine dieser Informationen ist die sogenannte Regelkurve. Dabei wird die Position der Mischluftklappen schrittweise von 0 auf 100 % erhöht. Abbildung 41 vergleicht die simulierten Werte mit den Angaben des Herstellers. Im Herstellerversuch wurde ein Klimagerät auf einem speziellen Prüfstand vermessen. Auf diesem Prüfstand wurde die Temperierung der Wärmetauscher über externe Wärme- und Kältekreisläufe sichergestellt. Durch diesen Umstand betrug die Heizwärmetauschertemperatur lediglich 90 °C während sie im typischen Fahrbetrieb etwa 102 °C beträgt. Das Klimagerätmodul geht ebenfalls von einer Heizwärmetauschertemperatur von 102 °C aus. Eine Korrektur für diesen Wert ist nicht implementiert.

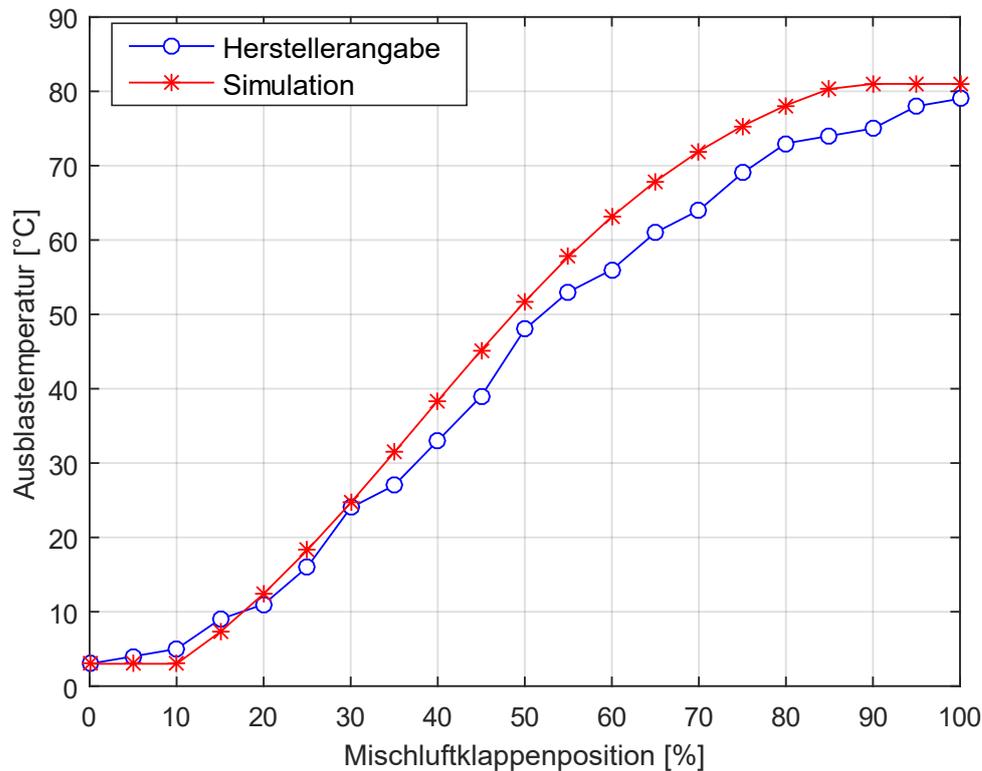


Abbildung 41. Vergleich der Regelkurve nach Herstellerangaben und der Simulation für die Belüftungstemperatur auf der Fahrerseite

Die Regelkurve wird durch das Modell gut abgebildet. Ab circa 50 % Klappenposition steigt die Abweichung zwischen Herstellerangabe und Simulation an. Diese zunehmende Abweichung kann durch den Unterschied in der Heizwärmetauschertemperatur erklärt werden. Für größere Werte der Mischluftklappenposition ist der Anteil der Luft, der durch den Heizwärmetauscher strömt, größer. Dadurch hat die Temperatur des Heizwärmetauschers einen größeren Einfluss auf die Ausblasteperatur.

Durch die Korrekturmodelle sind die Ausgabewerte des Modelles auf den Bereich von 3 °C (Verdampfertemperatur) und 81 °C (maximaler Sensorwert) limitiert. Ohne diese Limitierung würden Werte von -3 °C bis 85 °C vorhergesagt. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der Ausgabelimitierung in den Korrekturmodellen.

Für die Standardabweichung des Unterschieds zwischen gemessener und simulierter Ausblasteperatur wurden Werte zwischen 2,1 K und 0,9 K ermittelt. Diese Standardabweichung wurde auf der Basis von 16 Validierungsfahrten ermittelt.

4.1.3 Innenraum

Es wurden zwei verschiedene Versionen des Innenraummoduls erzeugt. Die beiden Versionen unterscheiden sich in der Datenquelle der Trainingsdaten und wurden unabhängig voneinander trainiert.

Für die Validierung wurden jeweils die Ergebnisse für beide Versionen berechnet und mit den gemessenen Werten aus Fahrzeugversuchen verglichen.

Beispielhaft werden zwei Validierungsfälle präsentiert. Der erste Versuch wurde im klimatisierten Windkanal unter exakt bekannten, kontrollierten Außenbedingungen durchgeführt. Der zweite Fall stellt eine Fahrt im Freien dar. Zunächst werden die Ergebnisse des Moduls auf Basis der IESS-Ergebnisse präsentiert. Im Anschluss werden die entsprechenden Ergebnisse, die mit dem Innenraummodul auf der Basis der Taitherm-Daten erzeugt wurden, präsentiert. Zur Vereinfachung werden die beiden Modulvarianten im nachfolgenden als IESS- bzw. Thaitherm-Modul bezeichnet.

Für die Massenströme lagen keine Messdaten vor, da eine Fahrt mit der installierten Messapparatur nicht möglich ist. Aus diesem Grund wurden für die Massenströme die Vorhersagen des Klimagerätmoduls verwendet. Zur Erzeugung der Massenstromvorhersagen wurden die Aktuatorpositionen aus den Messdateien ausgelesen und als Input für das Klimagerätmodul verwendet.

Windkanalversuch

Während des Versuchs wurde die Außentemperatur konstant auf 35 °C gehalten. Dazu lastete eine konstante Solarlast von 400 W/m² auf dem Fahrzeug. Die Strahlung kam dabei von Lampen direkt oberhalb des Fahrzeugs. Die relative Luftfeuchte betrug 25 % und das Fahrzeug fuhr mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h. Der Versuch dauerte etwa 30 Minuten. Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse des Versuchs. Die durchgezogenen Linien zeigen die gemessenen Ergebnisse und die gestrichelten Linien die entsprechenden Simulationsergebnisse.

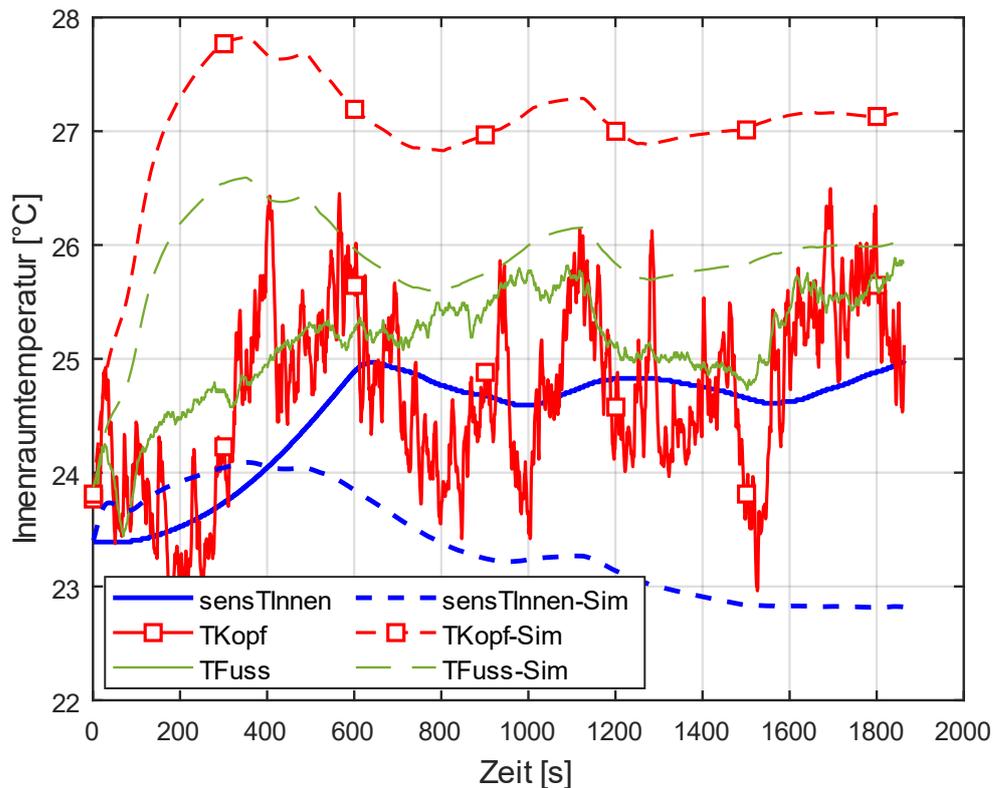


Abbildung 42. Gemessene und simulierte (gestrichelte Linien) Innenraumtemperaturen des IESS-Moduls

Zunächst fallen die starken Schwankungen in der gemessenen Kopfhöhentemperatur auf. Dies resultiert aus der Tatsache, dass diese Größe von einem einzelnen Sensor gemessen wird. Der Wert für die Fußhöhentemperatur dagegen stellt einen Mittelwert aus fünf Sensorsignalen dar. Die UIF Temperatur basiert ebenfalls auf einem einzelnen Sensorwert. Dieser Wert wird vor der Ausgabe jedoch mehrfach gefiltert und weist daher die geringsten Fluktuationen auf. Im Versuch steigen die Temperaturen zunächst an. Nach etwa 10 Minuten wird der Beharrungszustand erreicht und die gemessenen Temperaturen schwanken um einen konstanten Wert.

Die Simulationsergebnisse bilden den gemessenen zeitlichen Verlauf sehr gut ab. Insbesondere die Fußraumtemperatur wird sehr gut abgebildet. Die UIF Temperatur wird etwas zu kühl vorhergesagt und die Kopfhöhentemperatur etwas zu warm. Ausgehend von diesen Ergebnissen zeigt Abbildung 43 die Abweichung zwischen den gemessenen und den simulierten Lufttemperaturen für denselben Versuch.

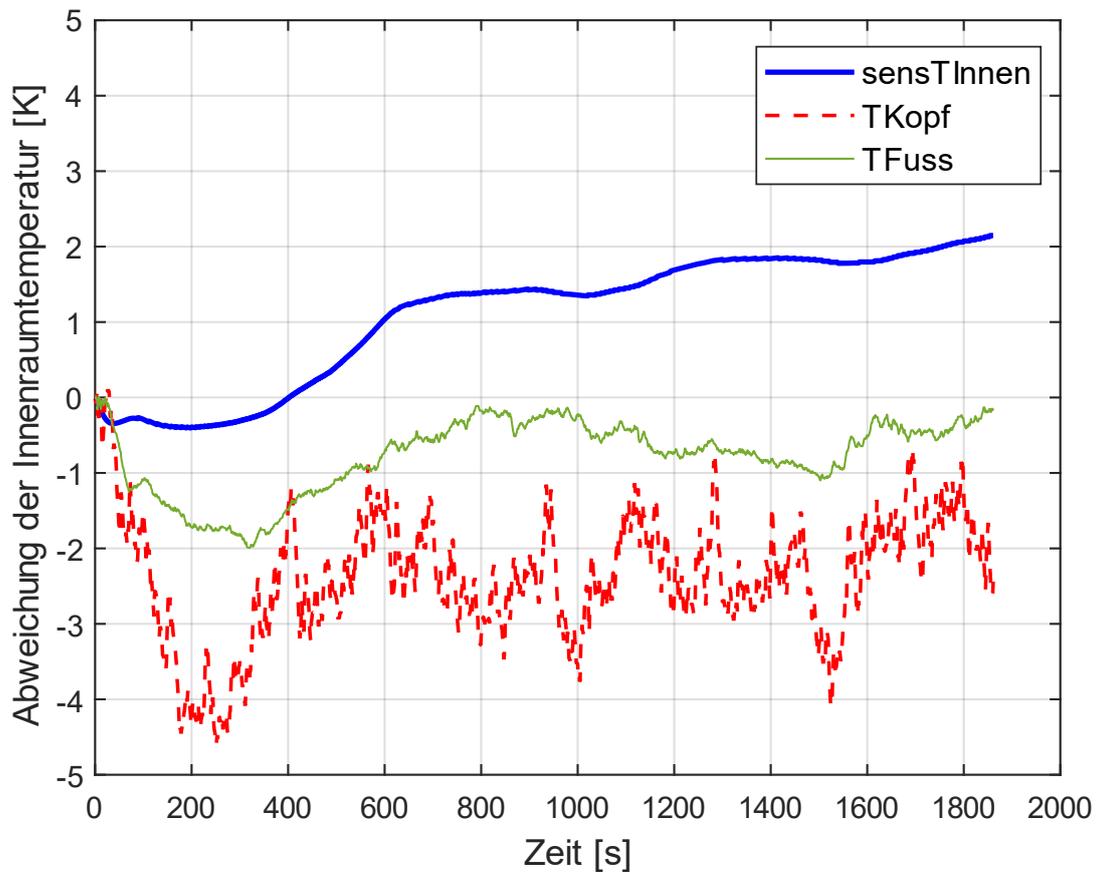


Abbildung 43. Abweichung zwischen gemessener und simulierter Temperatur für das IESS-Modul

Es zeigt sich, dass die Abweichungen sich innerhalb der ersten 600 Sekunden verändern und danach wiederum annähernd konstant sind. Die Abweichung bei der Fußhöhentemperatur ist kleiner als 1 K und die Abweichungen bei UIF Temperatur und Kopfhöhentemperatur betragen etwa 2 K.

Taitherm

Der vorgestellte Windkanalversuch wurde ebenfalls mit den Taitherm-Innenraummodul nachgebildet. Der Vergleich der Temperaturen ist in Abbildung 44 zu sehen und die Abweichung für die verschiedenen Innenraumtemperaturen wird in Abbildung 45 dargestellt.

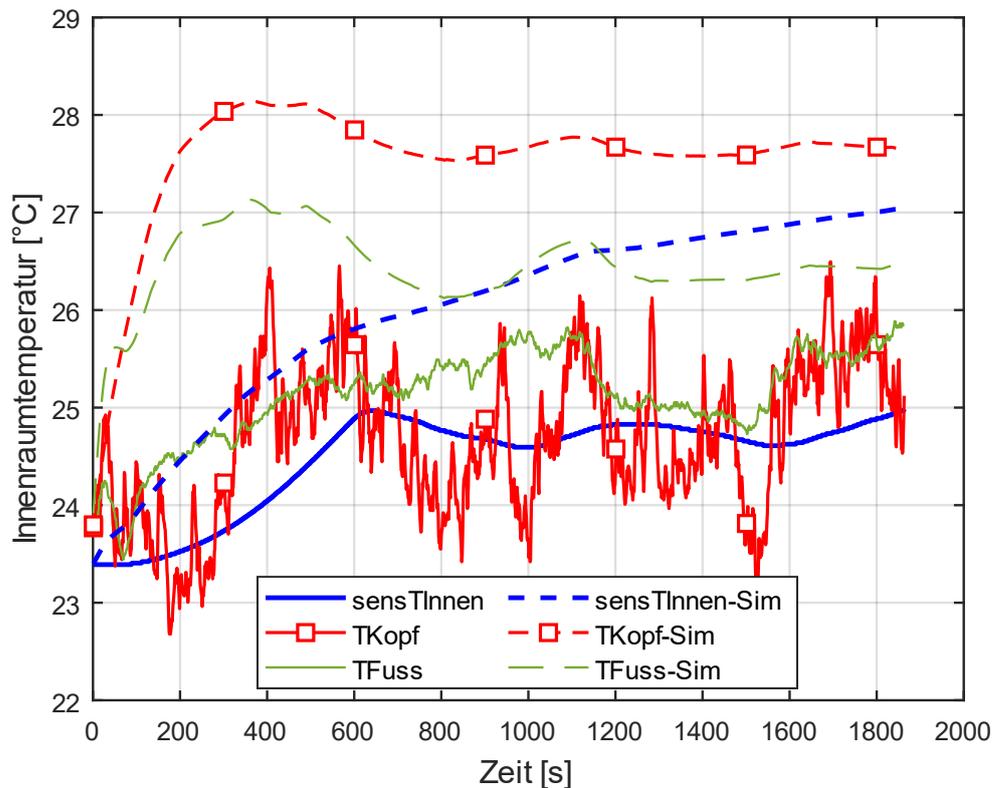


Abbildung 44. Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Innenraumtemperaturen im Taitherm-Modul

Beim Vergleich der Temperaturen ist zu erkennen, dass die Simulation für diesen Fall durchgängig zu hohe Werte vorhersagt. Durch die Initialisierung sind die vorhergesagten Werte anfangs identisch mit den gemessenen Werten. Die simulierten Werte steigen während der ersten 600 Sekunden zwischen 2,5 K und 4 K an und verbleiben danach auf dem erhöhten Niveau. Die gemessenen Temperaturen bleiben während der gesamten Messung jedoch weitestgehend konstant.

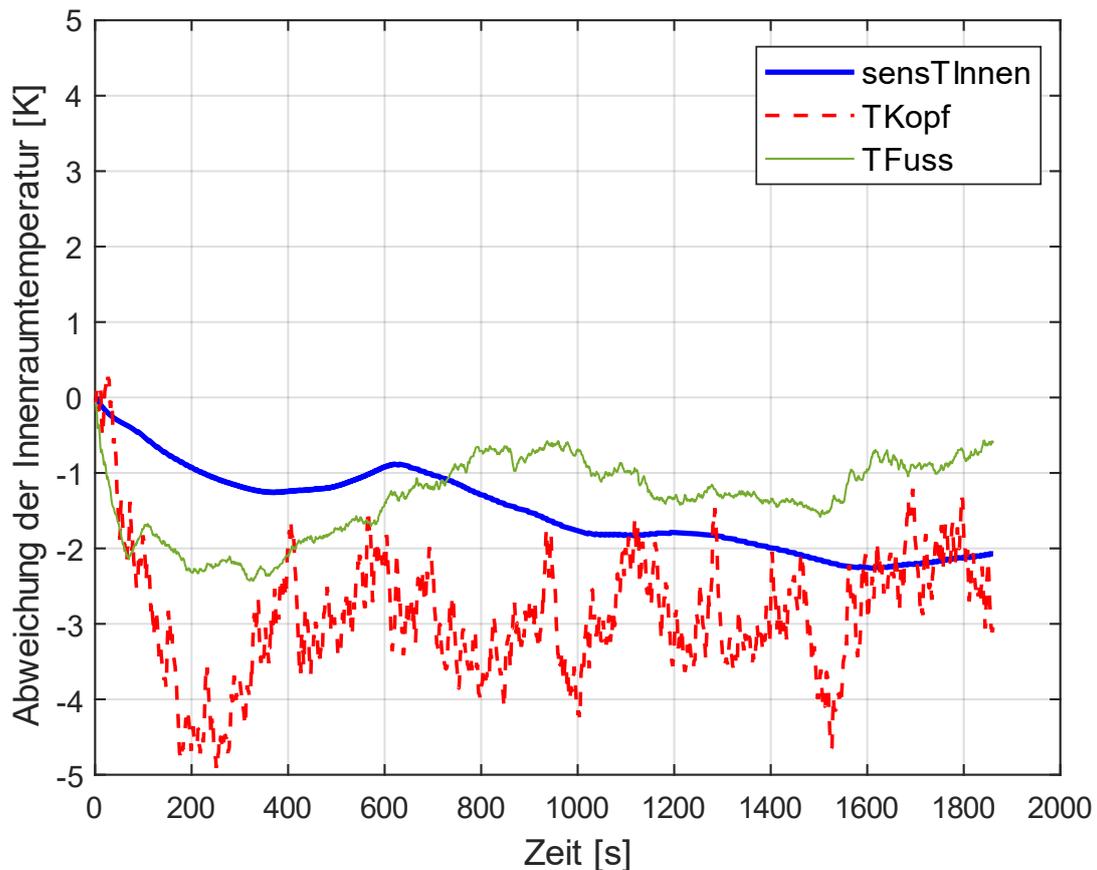


Abbildung 45. Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Innenraumtemperaturen im Taitherm-Modul

Die Abweichungen für die drei betrachteten Werte sind relativ konstant. Lediglich die Abweichung für die Lufttemperatur in Kopfhöhe weist kurzfristige Fluktuationen im Bereich von bis zu 1,5 K auf. Diese Fluktuationen werden durch das Rauschen des Messsignals hervorgerufen. Für einen geglätteten Verlauf der Abweichung ergibt sich allerdings ebenfalls ein recht konstanter Verlauf. Für die Fußtemperatur ergibt sich eine Abweichung von etwa 1 K. Für die UIF Temperatur beträgt dieser Wert etwa 2 K und für die Lufttemperatur in Kopfhöhe etwa 3 K.

Straßenerprobung

Die dazugehörige Validierungsfahrt fand an einem sonnigen Tag statt. Insgesamt dauerte die Fahrt etwa 45 Minuten. Abbildung 47 vergleicht die simulierten und gemessenen Lufttemperaturen im Bereich des UIF, der Kopfhöhe und der Fußhöhe auf der Fahrerseite. Dabei werden die Ergebnisse der IESS-Modulvariante betrachtet. Dabei sind die gemessenen Werte mit durchgezogenen Linien dargestellt und die simulierten Werte mit gestrichelten Linien. Die Lufttemperatur in Kopfhöhe bleibt während der gesamten Zeit sehr konstant bei etwa 23 °C. Die UIF Temperatur steigt während der ersten 25 Minuten von 25 °C auf etwa 27 °C und bleibt danach in diesem Bereich. Die Fußraumtemperatur steigt während der gesamten Fahrt langsam an.

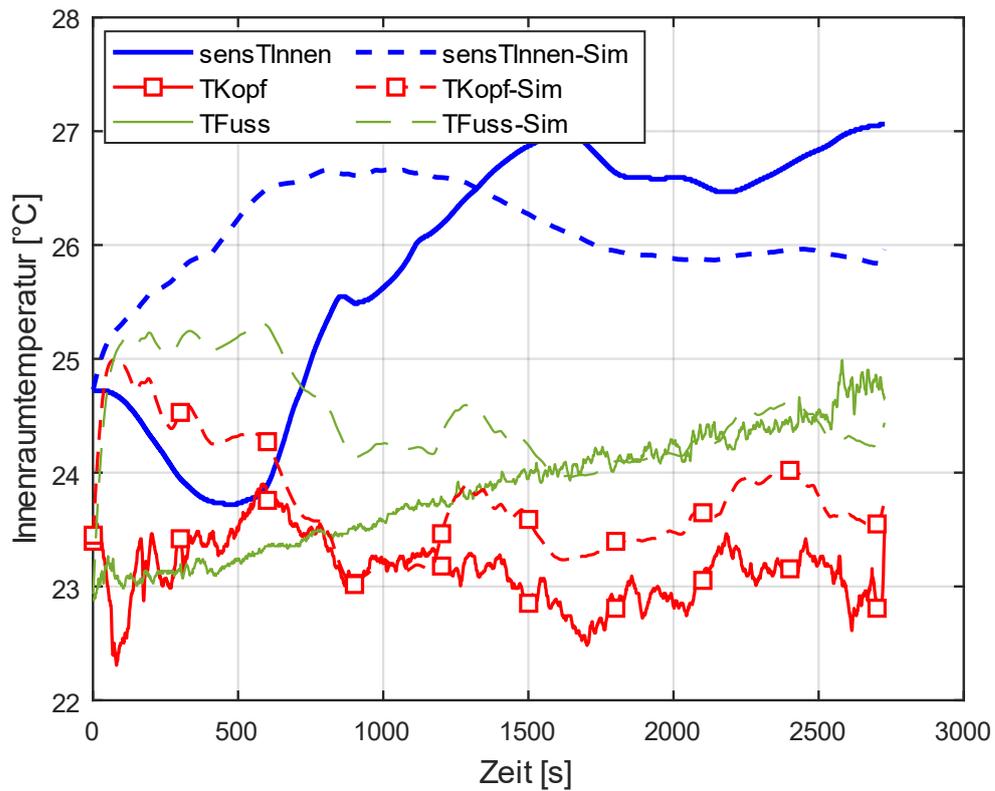


Abbildung 46. Gemessene und simulierte (gestrichelte Linien) Lufttemperaturen während der Fahrt

Der Verlauf der gemessenen Temperaturen wird von den simulierten Temperaturen gut nachgebildet. Lediglich in den ersten 10 Minuten kommt es zu größeren Abweichungen, die kurzfristig 2 K übersteigen. Danach bleiben die Abweichungen für alle drei gemessenen Temperaturen unter 1 K. Abbildung 47 zeigt die Abweichungen zwischen gemessener und simulierter Temperatur im Verlauf der Zeit.

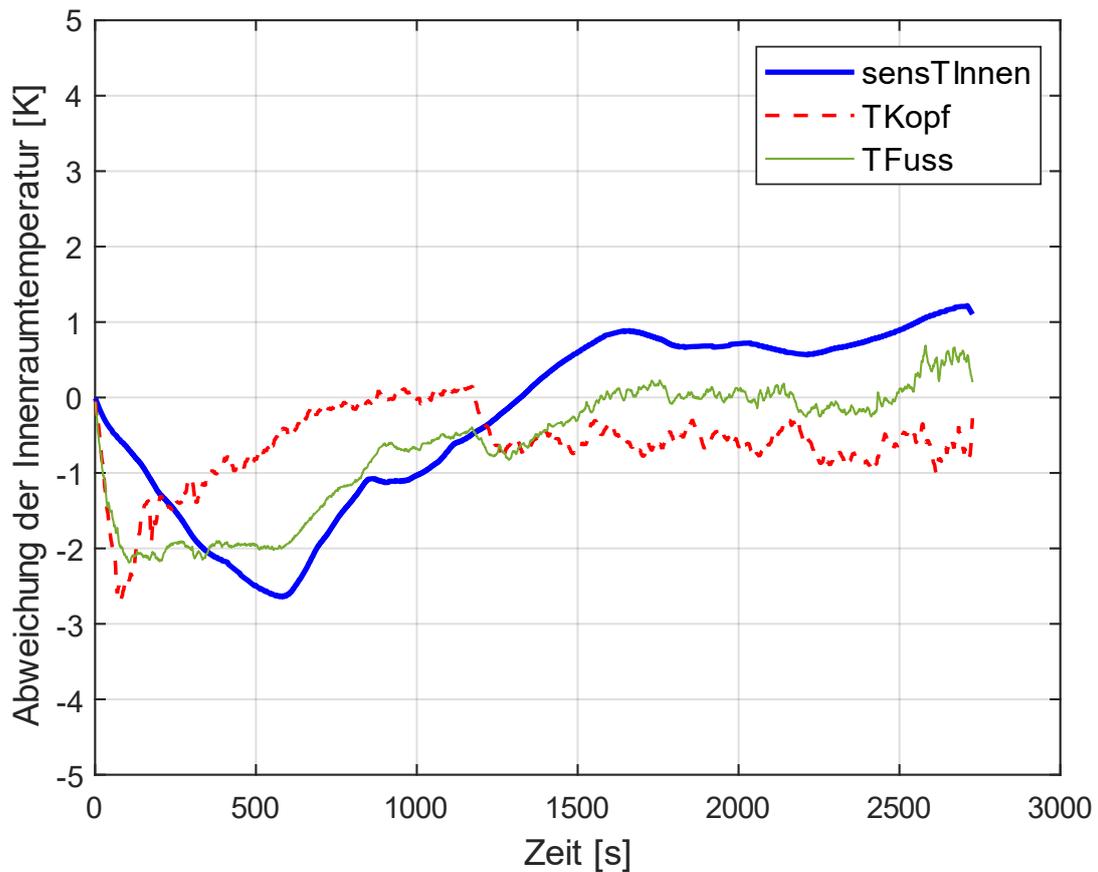


Abbildung 47. Abweichung zwischen gemessener und simulierter Temperatur

Die blaue Linie repräsentiert die Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Werten für die Innenraumtemperatur sensTInnen. Die rote Linie repräsentiert diese Werte für die Lufttemperatur in Kopfhöhe und die grüne für die Lufttemperatur im Fußbereich. Dort sind deutlich die Abweichungen von etwa 2 K in den ersten 600 Sekunden und die kleineren Werte im restlichen Verlauf der Fahrt zu erkennen.

Taitherm

Der Vergleich für das Taitherm-Modul wird in Abbildung 48 gezeigt. Abbildung 49 präsentiert die Abweichungen für die Validierungsfahrt. Wiederum wird dieselbe Validierungsfahrt wie zuvor betrachtet.

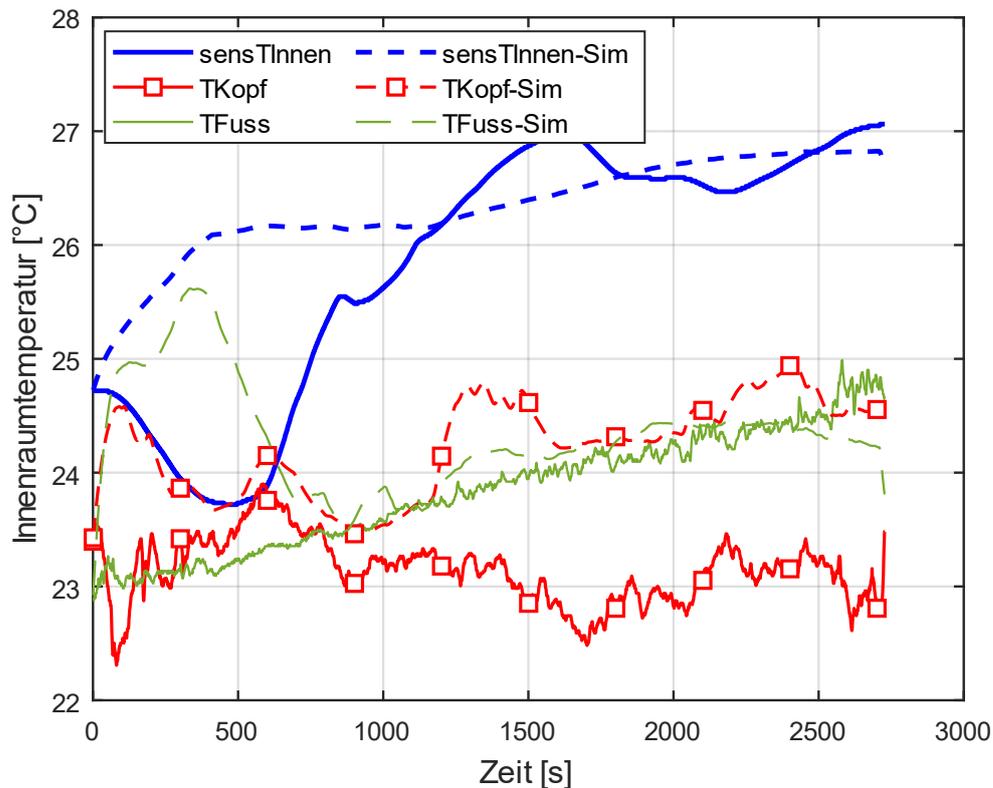


Abbildung 48. Vergleich zwischen gemessener und simulierter Temperatur für den Straßenversuch und das Taitherm-Modul

Das Taitherm-Modul stellt die gemessenen Werte sehr gut dar. Die simulierten Werte fluktuieren jedoch weniger stark als die Messwerte. Daher schwanken die Messwerte oftmals um die simulierten Werte. Zu Beginn der Messung kommt es zu größeren Abweichungen bei den Lufttemperaturen im Fußraum und den UIF Temperaturen. Im weiteren Verlauf verringern sich diese Abweichungen jedoch deutlich. Für die Lufttemperaturen in Kopfhöhe ergibt sich ein anderes Bild. Dort wird die gemessene Temperatur anfangs recht gut vorhergesagt. Im Verlauf der Zeit stellt sich jedoch eine etwas größere und konstante Abweichung zwischen Messung und Simulation ein.

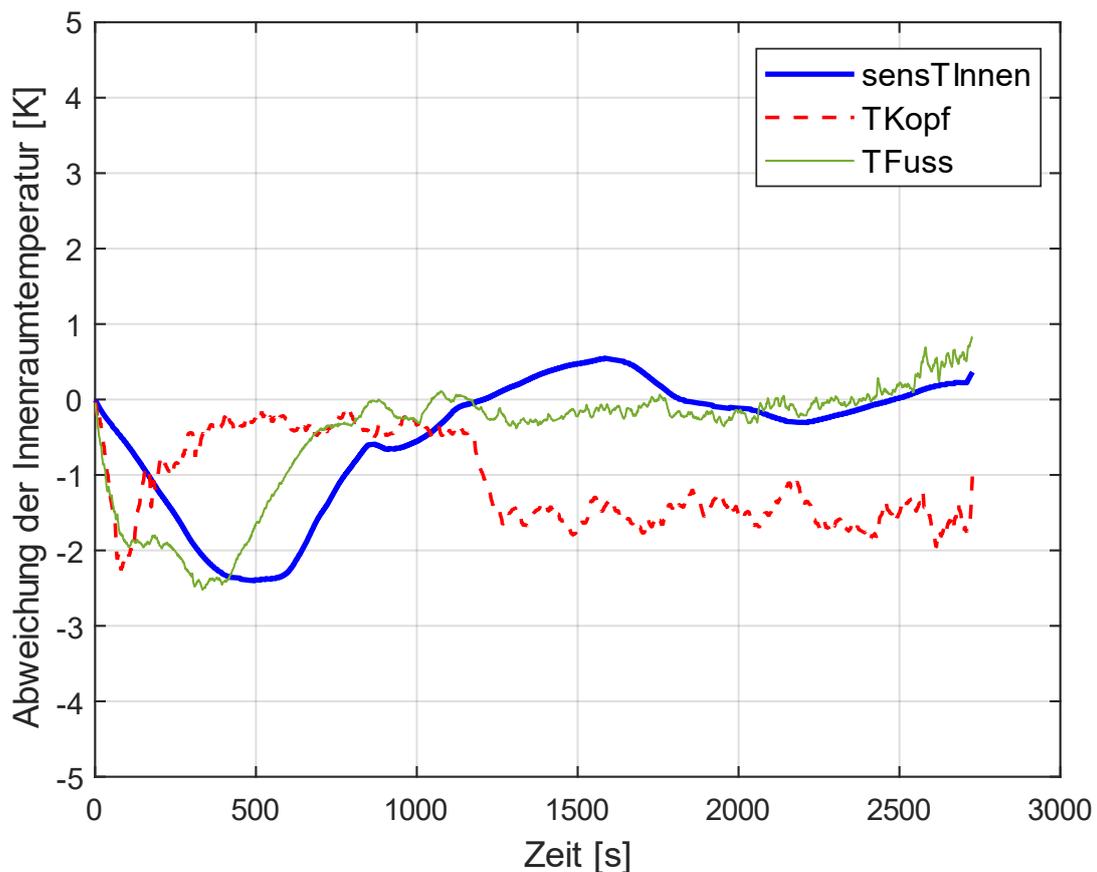


Abbildung 49. Abweichung zwischen gemessener und simulierter Temperatur

Im Plot der Abweichungen wird deutlich, dass die Abweichungen nach den anfänglich etwas größeren Werten stets unter 2 K bleiben. Die UIF Temperatur und die Fußraumtemperatur wird in der Beharrungsphase fast perfekt vorhergesagt. Die Abweichung schwankt im Bereich von $\pm 0,5$ K. Lediglich die Kopfhöhentemperaturen werden etwa 1,5 K zu warm vorhergesagt.

Die beiden dargestellten Fälle stellen jeweils nur Einzelfälle dar. Die vorgestellte Straßenerprobung ist ein Fall mit relativ geringen Abweichungen. Über das gesamte Set an verfügbaren Validierungsversuchen wurde die Standardabweichung für die verschiedenen Werte ermittelt. Dabei wurden Standardabweichungen von 2,0 K für die UIF Temperatur sensTInnen, 3,3 K für die Fußraumtemperatur und 1,3 K für die Kopfhöhentemperatur ermittelt. Diese Werte beziehen sich auf das Innenraummodul auf Basis der IESS-Simulationen. Für das Innenraummodul auf Basis der Taitherm-Daten betragen diese Werte 1,9 K für die UIF Temperatur, 3,3 K für die Fußtemperaturen und 1,8 K für die Kopftemperaturen.

4.2 Teilsysteme

Nachdem die drei Hauptmodule individuell validiert und deren Qualität ermittelt wurde, wurden auch mögliche Kombinationen der Module validiert. Das Verfahren war dabei dasselbe wie im vorausgegangenen Schritt. Allerdings wurden diesmal die Ergebnisse des ersten Moduls als Input des zweiten Moduls verwendet. Die untersuchten Kombinationen sind Regler-Klimagerät und Klimagerät-Innenraum. Für das Innenraummodul wurden erneut sowohl die IESS als auch die Taitherm-Variante betrachtet. Die Kombination aus zwei Modulen wird im Folgenden als Modell bezeichnet.

4.2.1 Regler-Klimagerät

In diesem Schritt wird die Kombination aus Regler und Klimagerät validiert. In diesem Setup werden die Sensorgrößen, die sich auf den Innenraum beziehen, aus den Messungen geladen und als Eingangsgrößen für das Reglermodul verwendet. Die errechneten Aktuatorpositionen werden anschließend in das Klimagerätmodul gespeist. Die errechneten Ausblastemperaturen werden mit den gemessenen Werten verglichen. Für Ausblastemperaturen, die an den Regler zurückgeführt werden, werden ebenfalls die errechneten Werte verwendet.

Für die Verdampfer Temperatur wird der gemessene Wert verwendet. Diese Entscheidung wurde getroffen, da in den meisten Fällen die Schwankungen der gemessenen Verdampfer Temperatur deutlich größer als die Veränderungen im Sollwert sind. Das Modell ist jedoch nicht in der Lage die tatsächliche Verdampfer Temperatur zu berechnen. Nachfolgend werden die Ergebnisse für eine Validierungsfahrt präsentiert. Dabei wird sowohl auf die Ergebnisse des Reglermoduls als auch auf die Ergebnisse des Klimagerätmoduls eingegangen.

Zunächst werden die Verläufe der Aktuatorwerte verglichen. Abbildung 50 zeigt jeweils die gemessenen und simulierten Werte für verschiedene Klappenpositionen. In dieser Abbildung sind die simulierten Werte jeweils als gestrichelte Linie dargestellt. Für die Position der Mischluftklappe ergeben sich nur sehr geringe Abweichungen. Bei der Fußraumklappe kommt es dreimal kurzzeitig zu Abweichungen von etwa 5 %. Bei der Gebläseleistung kommt es zu einer länger anhaltenden Abweichung von etwa 3 %. Trotz dieser Abweichungen wird das Verhalten der Regelung gut reproduziert.

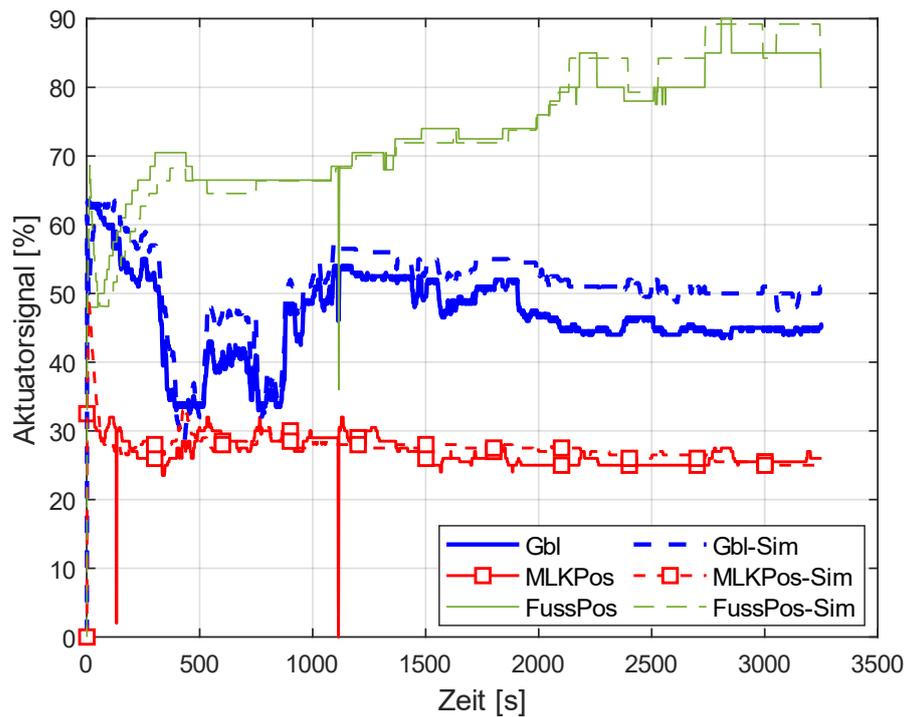


Abbildung 50. Vergleich der gemessenen und der simulierten Aktuatorsignale

Neben den Reglersignalen wurden auch die Ausblastemperaturen betrachtet. Abbildung 51 zeigt die berechnete Abweichung zwischen Simulation und Messung für zwei verschiedene Ausblastemperaturen im Verlauf der Zeit. Als Vergleichsfahrt wurde wiederum eine Straßenfahrt verwendet.

Die Ausblastemperaturen werden zuverlässig simuliert. Nach den initialen größeren Abweichungen halten sich die Abweichungen der Ausblastemperaturen im Bereich von -1 K bis +2 K. Die Abweichungen bleiben relativ konstant.

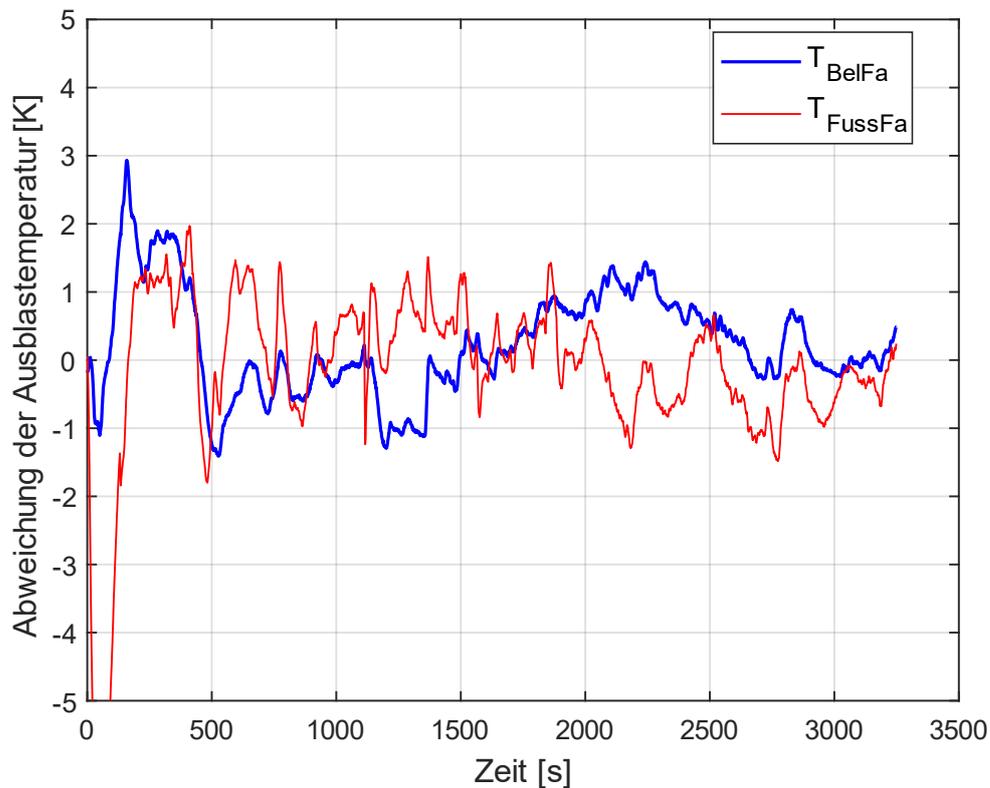


Abbildung 51. Abweichung der Ausblastemperaturen

Die Standardabweichung des Fehlers betrug für das gesamte Validierungsset für die Belüftungskanäle etwa 1,2 K und für die Fußraumkanäle etwa 0,3 K. Dies ist eine deutliche Verringerung gegenüber der isolierten Betrachtung des Moduls für das Klimagerät. Dies zeigt, dass die Regelung der Ausblastemperaturen funktioniert und die Abweichungen signifikant verringert. Die geringen Abweichungen in den Reglersignalen wirken regulierend auf die Ausblastemperaturen.

4.2.2 Klimagerät-Innenraum

Die Kombination aus Klimagerät und Innenraummodul wurde validiert. Die Aktuatorpositionen wurden aus den Messaufzeichnungen geladen. Die Ausblasbedingungen wurden errechnet und als Eingangsgrößen für das Innenraummodul verwendet. Sowohl die errechneten Innenraumtemperaturen als auch die Ausblastemperaturen wurden mit den aufgezeichneten Werten verglichen. Diese Prozedur wurde für beide Versionen des Innenraummoduls durchgeführt. Zunächst werden die Ergebnisse für das Modell auf Basis der IESS-Daten präsentiert und danach die Ergebnisse auf Basis der Taitherm-Daten.

Da die Reglerinputs geladen wurden, wurden bei den Ausblastemperaturen dieselben Ergebnisse wie bei der isolierten Betrachtung des Klimagerätmoduls erzielt. Bei den Innenraumtemperaturen ergeben sich jedoch unterschiedliche Ergebnisse, weil das Innenraummodul auf den Ergebnissen des Klimagerätmoduls aufbaut. Aus diesem Grund werden im Folgenden lediglich die Vergleiche für die Werte der Innenraumtemperaturen gezeigt.

IESS

Abbildung 52 vergleicht die gemessenen und simulierten Innenraumtemperaturen für eine Straßenerprobung. Die Fahrt startete am frühen Morgen. Nach einer wolkenlosen Nacht betrug die Außentemperatur etwa 3 °C und das Fahrzeug war stark heruntergekühlt. Im Laufe der Fahrt erhöhte sich die Außentemperatur auf etwa 10 °C und es wirkte intensive Solarstrahlung auf das Fahrzeug.

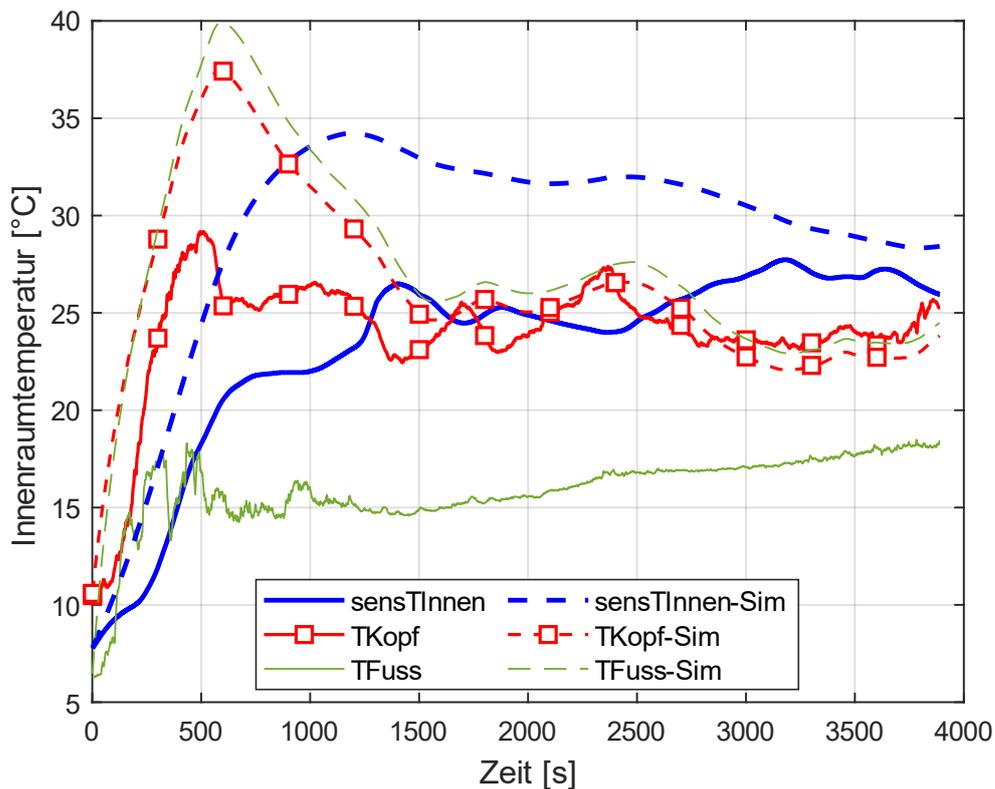


Abbildung 52. Vergleich der gemessenen und errechneten Innenraumtemperaturen mit dem IESS-Innenraummodul

Zu Beginn war der HWT noch nicht auf der normalen Betriebstemperatur. Im Modell wird dies jedoch angenommen. Daher werden zu Beginn der Fahrt zu hohe Ausblastemperaturen vorhergesagt. Aufgrund der hohen Ausblastemperaturen wird auch die Aufheizung des Innenraums zu schnell und zu stark vorhergesagt. Im Laufe der Fahrt erwärmt sich der HWT, sodass der Fehler in der Ausblastemperatur abnimmt. Daher fallen die simulierten Innenraumtemperaturen mit der Zeit von den zu hohen Ausgangspositionen langsam ab. Die gemessenen und simulierten Innenraumtemperaturen nähern sich an. Lediglich bei der Fußraumtemperatur verbleibt eine größere Abweichung zum Ende der Fahrt. Der Unterschied beträgt etwa 7 K. Die Ähnlichkeit der Verläufe für die Lufttemperaturen im Kopfraum und im Fußraum ist ebenfalls auffällig.

Über das gesamte Validierungsset wurden Standardabweichungen von 2,1 K für die UIF Temperatur, 2,9 K für die Lufttemperatur im Fußraum und 1,5 K für die Lufttemperatur in Kopfhöhe ermittelt. Die Werte für die UIF Temperatur und die Fußraumtemperatur sind etwas niedriger als für die isolierte Betrachtung

des Innenraummoduls. Für die Kopfhöhentemperatur erhöht sich der Wert leicht von 1,3 K auf 1,5 K. Diese Betrachtung zeigt, dass sich die Fehler des Klimagerätmoduls und des Innenraummoduls nicht signifikant beeinflussen.

Taitherm

Für die Innenraummodul auf Basis der Taitherm-Ergebnisse lassen sich ähnliche Aussagen treffen. Der Vergleich für die Innenraumtemperaturen wird in Abbildung 53 gezeigt.

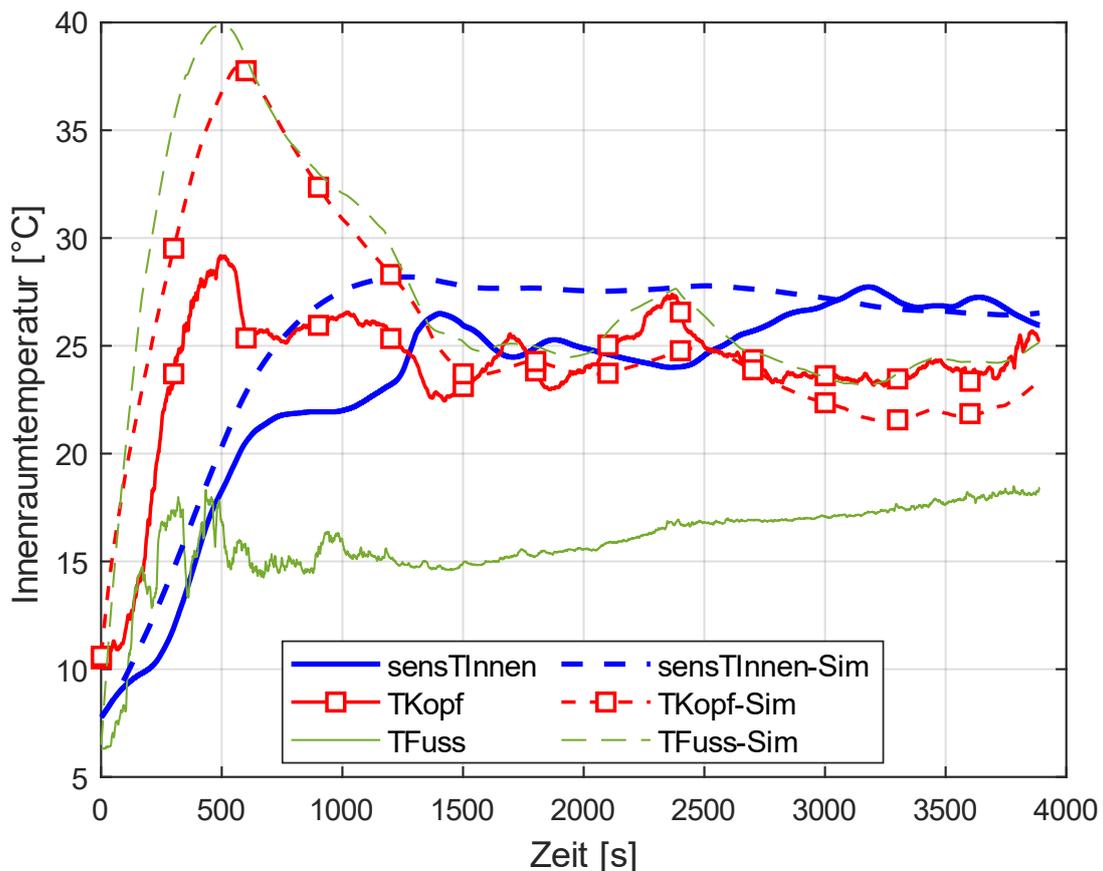


Abbildung 53. Vergleich der gemessenen und errechneten Innenraumtemperaturen mit dem Taitherm-Innenraummodul

Wiederum lassen sich bei diesem Vergleich die deutlichen Ausschläge der Kopf- und Fußraumtemperaturen zum Beginn der Fahrt erkennen. Diese können auf die Modellierung des Heizwärmetauschers zurückgeführt werden. Nach der anfänglichen Abweichung wird die Kopfraumtemperatur mit einer sehr geringen Abweichung abgebildet. Für die Fußraumtemperatur erzeugt die Simulation jedoch deutlich höhere Temperaturen als gemessen wurden. Auch diese Abweichung verringert sich im Verlauf der Zeit. Am Ende der Fahrt beträgt die Abweichung jedoch noch immer etwa 7 K. Die UIF Temperatur wird von dem Modell über den gesamten Fahrtverlauf hinweg sehr gut vorhergesagt. Auch hier wird zunächst ein etwas zu hoher Wert vorhergesagt. Die Abweichung ist jedoch deutlich geringer als bei den anderen beiden Signalen und besteht nur über einen kurzen Zeitraum.

Über den gesamten Validierungsdatensatz wurden Standardabweichungen von 2,1 K für die UIF Temperatur, 3 K für die Fußtemperaturen und 2,2 K für die Kopftemperaturen ermittelt. Auch für das Taitherm-Modell unterscheiden sich diese Werte daher nur geringfügig von der isolierten Betrachtung der jeweiligen Innenraummodule.

4.3 Gesamtsystem

Die Validierung des Gesamtmodells stellt den letzten Schritt der Validierung dar. Die Sensorgrößen für die Außenbedingungen wurden den Aufzeichnungen entnommen. Nachdem alle relevanten Größen mit den Anfangswerten aus den Aufzeichnungen initialisiert wurden, wurden diese Werte für die gesamte Fahrt errechnet und die Ergebnisse mit den gemessenen Werten verglichen. Zwei verschiedene Fälle wurden untersucht. Ein statischer Fall unter konstanten, exakt bekannten Außenbedingungen und ein zweiter Fall. Dieser zweite Fall stellt eine Fahrt unter schwankenden Außenbedingungen dar. Die exakten Außenbedingungen sind darüber hinaus nicht exakt bekannt, sondern wurden lediglich über die Sensoren des Fahrzeugs aufgezeichnet.

4.3.1 IESS

Zunächst wird das Gesamtmodell auf Basis der IESS-Daten validiert. Dazu werden zunächst exemplarisch die Ergebnisse einer Straßenerprobung gezeigt und analysiert. Diese Fahrt fand am Morgen eines sonnigen Tages statt. Vor Beginn der Fahrt wurde bereits eine weitere Testfahrt durchgeführt, sodass der Motor bereits aufgewärmt war und auch der Innenraum bereits zu einem gewissen Grad aufgewärmt war.

Reglergrößen

Zunächst wird das Verhalten der Regelung im Fahrzeug und in der Simulation verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 54 dargestellt. Dort sind die Gebläseleistung sowie die Klappenposition der Mischluftklappe und der Fußraumklappe auf der Fahrerseite abgebildet. Die gemessenen Werte sind jeweils durch durchgezogene Linien dargestellt und die simulierten Werte durch gestrichelte Linien.

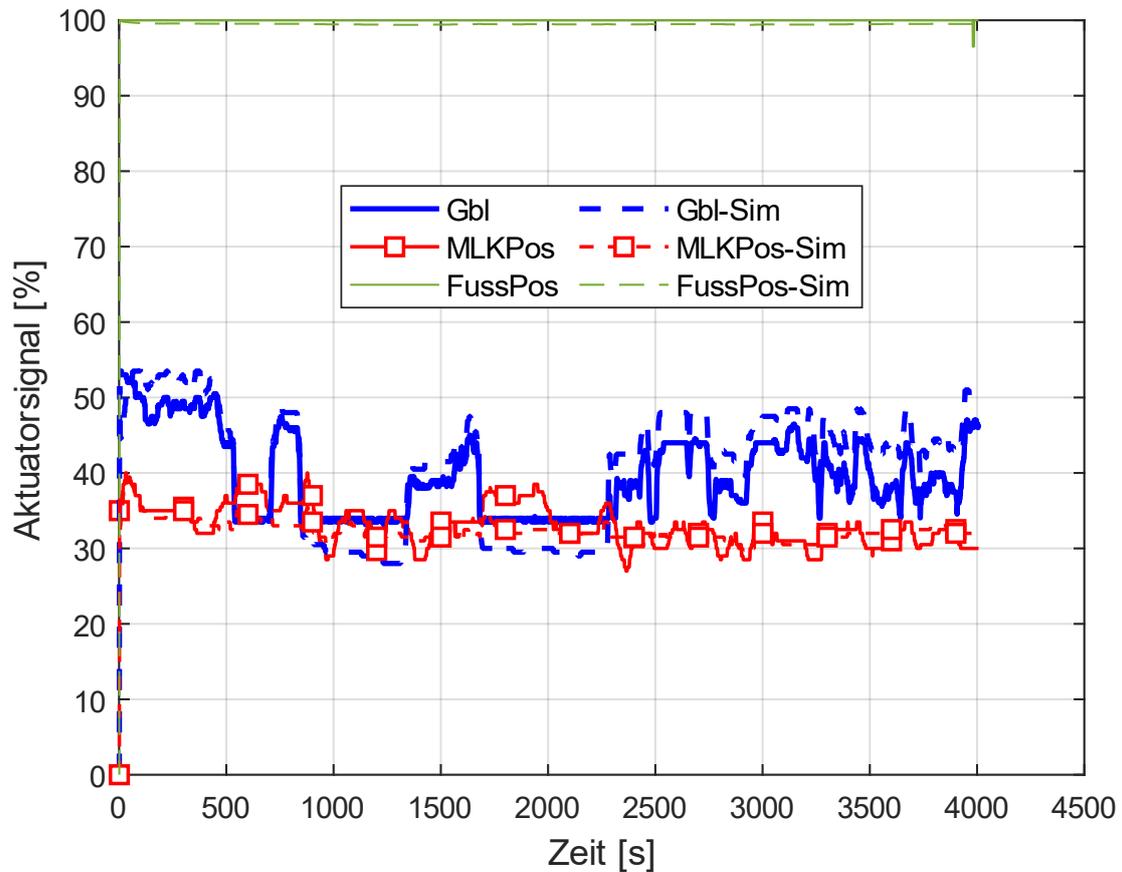


Abbildung 54. Vergleich des gemessenen und simulierten Reglerverhaltens

Die Fußraumklappe war über die gesamte Fahrt zu 100 % geöffnet. Dies wurde auch korrekt vom Modell reproduziert. Auch der Verlauf der Gebläseleistung und der Mischluftklappe wurde trotz zahlreicher Schwankungen korrekt abgebildet. Die maximale Abweichung beträgt etwa 5 %.

Ausblastemperaturen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ausblastemperaturen analysiert. Abbildung 55 zeigt den Vergleich der Ergebnisse für die Ausblastemperaturen. Wiederum sind die simulierten Ergebnisse durch gestrichelte Linien dargestellt.

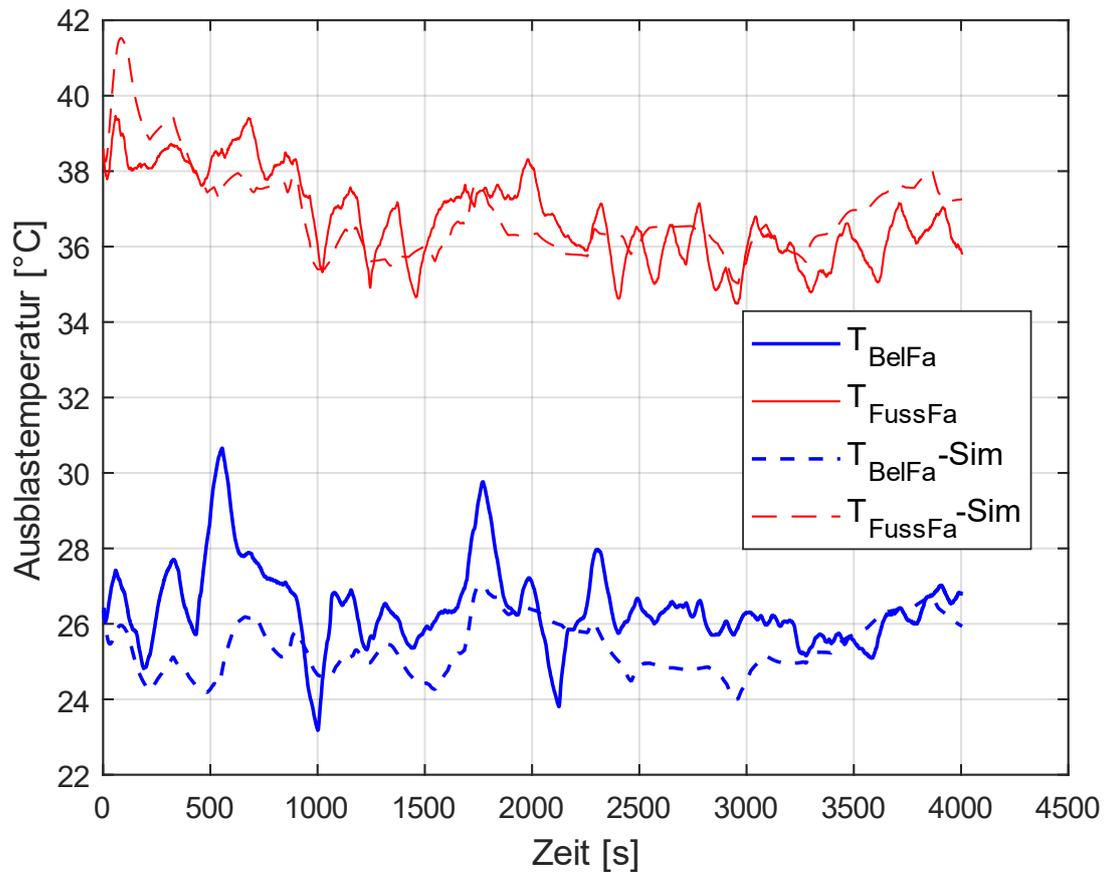


Abbildung 55. Vergleich der simulierten und gemessenen Ausblastemperaturen

Sowohl für die Belüftungskanäle als auch für die Fußraumkanäle sind jeweils die Ausblastemperaturen für die Fahrer- und Beifahrerseite abgebildet. Für alle Temperaturen wird der zeitliche Verlauf gut nachgebildet. Bei den Belüftungstemperaturen kommt es zu einigen kurzzeitigen Schwankungen, die von den simulierten Daten nicht abgebildet werden. Dadurch kommt es zu einigen kurzfristigen Abweichungen zwischen Messung und Simulation von bis zu 5 K.

Innenraumtemperaturen

Die Lufttemperaturen im Innenraum stellen den letzten Aspekt der Validierung dar. Abbildung 56 vergleicht die simulierten und die gemessenen Innenraumtemperaturen.

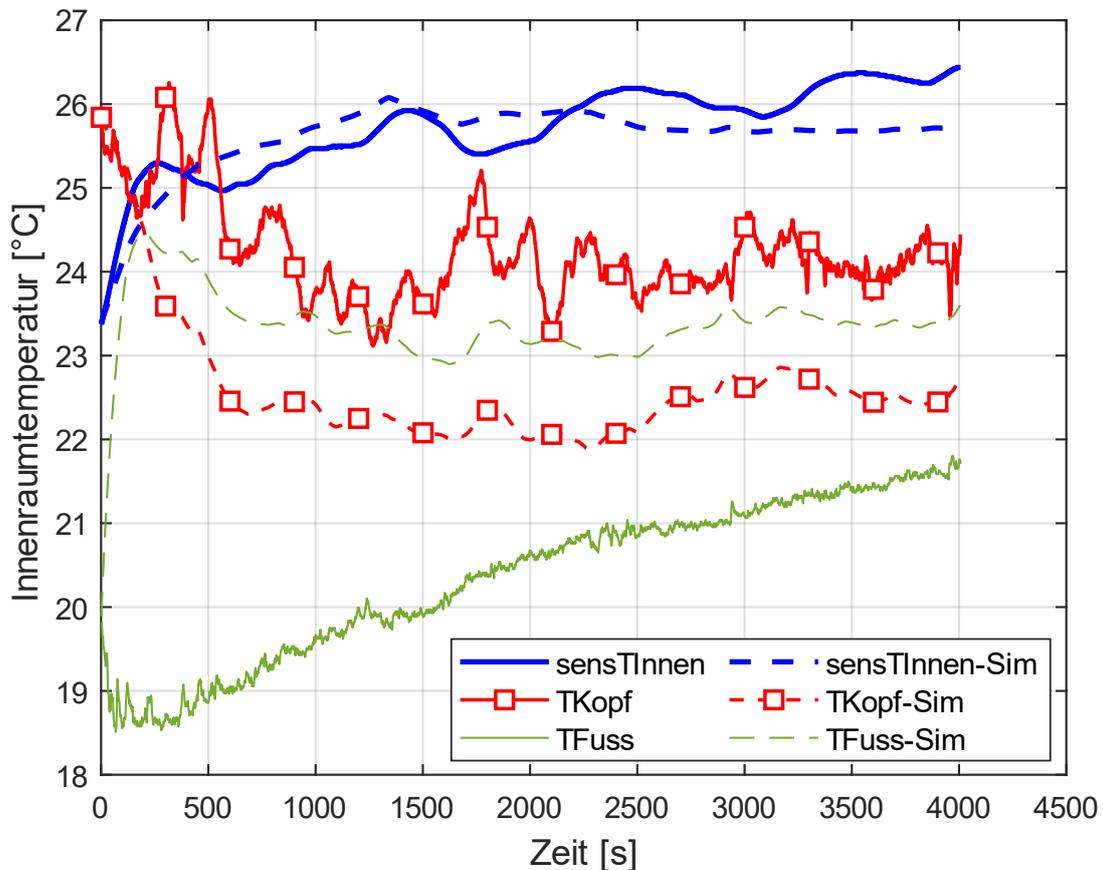


Abbildung 56. Abweichung zwischen simulierter und gemessener Lufttemperatur

Das Sensorsignal des UIF, die Lufttemperatur in Kopfhöhe des Fahrers und die Lufttemperatur im Fußraum des Fahrers sind abgebildet. Die durchgezogenen Linien repräsentieren die gemessenen Werte und die gestrichelten Linien die Simulationsergebnisse.

Die UIF Werte werden vom Modell fast perfekt abgebildet und es kommt lediglich zu leichten Abweichungen von weniger als 1 K. Die Kopfhöhentemperatur wird ebenfalls gut abgebildet. Allerdings gibt es einen Offset von etwa 2 K. Die Temperatur wird zu niedrig vorhergesagt. Bei der Fußraumtemperatur ergeben sich größere Abweichungen zwischen Messung und Modell. Die Abweichung beträgt anfangs 5 K und verringert sich im Verlauf der Zeit auf etwa 2 K. Während eine annähernd konstante Fußraumtemperatur vorhergesagt wird, steigt die Temperatur im Versuch stetig an, erreicht jedoch bis zum Ende des Versuchs nicht den vorhergesagten Wert.

Neben der fallweisen Betrachtung der Ergebnisse zur Plausibilisierung wurden ebenfalls die Standardabweichungen der Fehler innerhalb der verfügbaren Validierungsdaten ermittelt. Die ermittelten Standardabweichungen der Fehler sind:

2,3 K für die Ausblastemperaturen der Belüftungskanäle

1,4 K für die Ausblastemperaturen der Fußkanäle

1,3 K für die Kopfraumtemperaturen

3 K für die Fußraumtemperaturen und

1,2 K für die UIF Temperatur

Bei der Zielgröße des thermischen Komforts betrug die Standardabweichung des Fehlers 0,4.

4.3.2 Taitherm

Nachdem das erste Gesamtmodell validiert wurde, werden nun die Ergebnisse des zweiten Gesamtmodells mit der Taitherm-Variante des Innenraummoduls gezeigt. Dabei wird erneut dieselbe Validierungsfahrt betrachtet. Dies erlaubt eine bessere Vergleichbarkeit der beiden Modellvarianten.

Reglergrößen

Abbildung 57 vergleicht die gemessenen und die simulierten Reglersignale. Die simulierten Verläufe sind mit gestrichelten Linien dargestellt. Über den gesamten Verlauf der Fahrt sind nur geringe Abweichungen zwischen den beiden Verläufen zu erkennen.

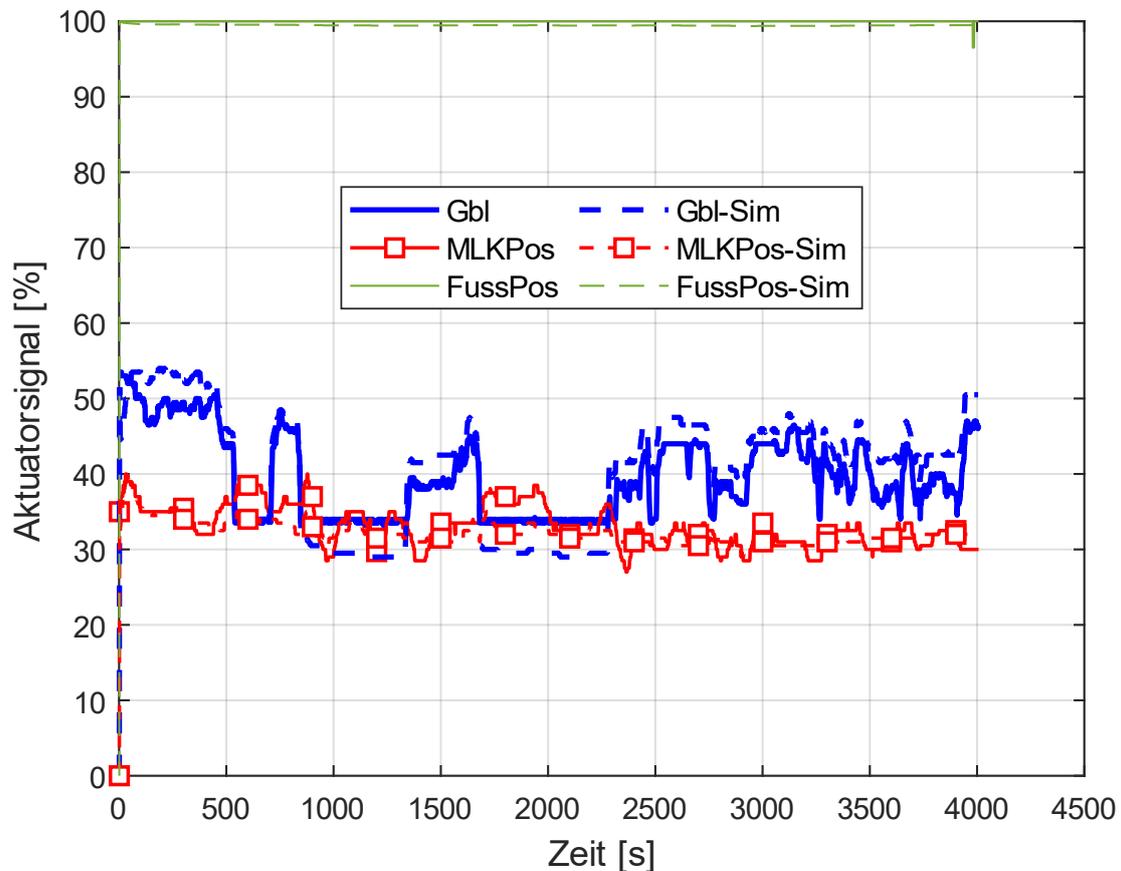


Abbildung 57. Vergleich ausgewählter Reglergrößen zwischen Simulation (gestrichelte Linie) und Messung

Ausblastemperaturen

Der Vergleich der Ausblastemperaturen wird in Abbildung 58 gezeigt. Die gemessenen Ausblastemperaturen werden sehr gut durch das Modell nachgestellt. Lediglich kleinere Fluktuationen in den Messdaten werden von dem Modell nicht nachgestellt.

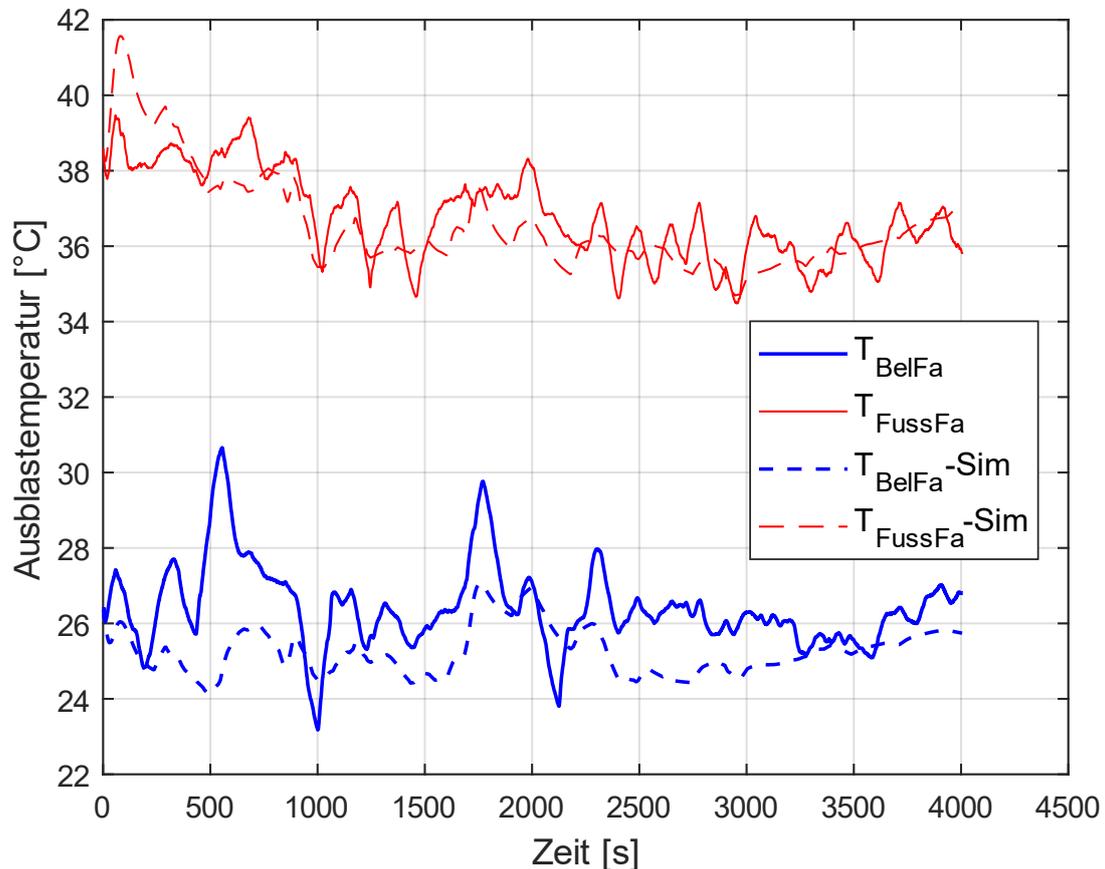


Abbildung 58. Vergleich der simulierten (gestrichelte Linien) und gemessenen Ausblastemperaturen

Bei den Ausblastemperaturen der Belüftungsebene kommt es zu kleineren Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Diese Abweichungen sind im Bereich von ein bis zwei Kelvin. Kurzzeitig kommt es vereinzelt auch zu größeren Abweichungen. Für den größten Teil der Messung sind die simulierten Werte etwas zu niedrig.

Innenraumtemperaturen

Ein Vergleich zwischen den gemessenen und den simulierten Innenraumtemperaturen wird in Abbildung 59 präsentiert. Wiederum sind die gemessenen Werte durch durchgezogene Linien dargestellt und die simulierten Werte durch gestrichelte Linien.

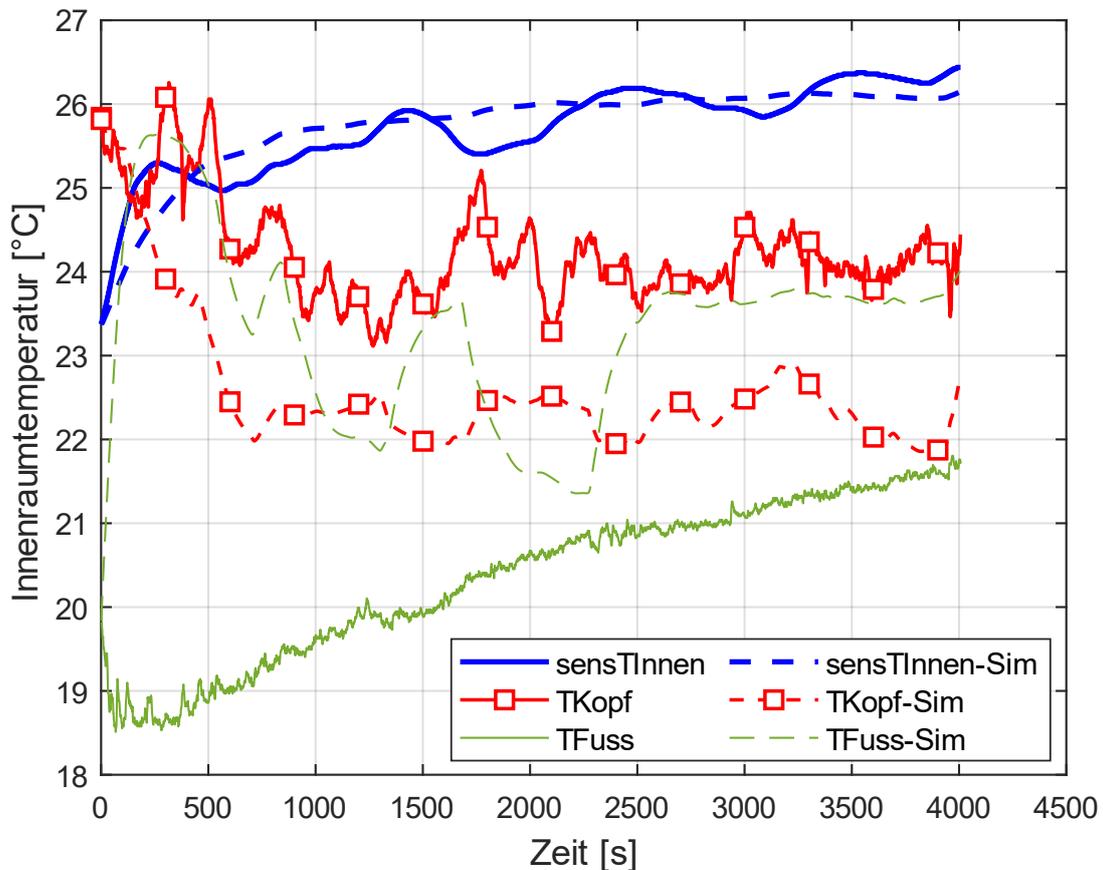


Abbildung 59. Vergleich zwischen simulierten (gestrichelte Linien) und gemessenen Lufttemperaturen

Der Verlauf der UIF Temperatur, sensTInnen wird vom Modell gut abgebildet. Bei den Lufttemperaturen im Fußraum und in Kopfhöhe kommt es jedoch zu größeren Abweichungen. Die Lufttemperaturen in Kopfhöhe werden zu gering vorhergesagt und die Fußraumtemperaturen zu warm. Außerdem wird für diese Temperatur ein konstanter Wert vorhergesagt, während in der Messung ein stetig ansteigender Wert zu beobachten ist.

Über die Gesamtheit des Validierungssets wurden für die Fehler Standardabweichungen von

2,3 K für die Ausblastemperaturen der Belüftungskanäle

1,4 K für die Ausblastemperaturen der Fußkanäle

1,9 K für die Kopfraumtemperaturen

3,2 K für die Fußraumtemperaturen und

1,1 K für die UIF Temperatur

ermittelt. Bei der Zielgröße des thermischen Komforts betrug die Standardabweichung des Fehlers 0,4. In Bezug auf die gewählte Zielgröße weisen beide Modellvarianten also eine identische Ungenauigkeit auf.

Es ist auffällig, dass sich die beiden Modelle in der Genauigkeit der Vorhersage der Lufttemperaturen in Kopfhöhe unterscheiden, die Genauigkeit bei der Zielgröße, die auf den Kopfhöhentemperaturen basiert, jedoch gleich ist. Dies wird durch unterschiedliche Mittelungsverfahren erklärt. Bei der Standardabweichung wurde jeweils der Mittelwert der Standardabweichungen für Fahrerseite und Beifahrerseite angegeben. Für die Zielgröße wurde jedoch die Standardabweichung der Mittelwerte aus Fahrer und Beifahrerseite angegeben.

Zusammenfassung

Für die weiteren Untersuchungen wird jeweils das Gesamtmodell verwendet und die relevante Größe ist die Lufttemperatur in Kopfhöhe. Dies ist daher die relevante Fehlergröße für die Modellqualität. Auf der Basis des Validierungssets bestehend aus 16 Versuchen wurde eine Schätzung der Modellgenauigkeit durchgeführt. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die Validierungsversuche nicht den gesamten Betriebsbereich abdecken. Der Großteil der Versuche fand bei Außentemperaturen zwischen 5 °C und 25 °C statt. Sowohl heiße als auch kalte Außentemperaturen wurden nicht validiert.

Für das Modell mit den Innenraummodul basierend auf den IESS-Daten wurde eine Standardabweichung von 1,2 K ermittelt. Der 95 % Konfidenzintervall für die Vorhersage der Zielmetrik beträgt 0,8. Für das Gesamtmodell auf der Basis der Taitherm-Daten betragen diese Werte 1,1 K und ebenfalls 0,8.

Die Betrachtung mehrerer Versuche legt die Vermutung nahe, dass die Zeitkonstante für das PT-1 Glied für die Lufttemperatur im Fußraum zu gering angenommen wird und sich stark von den Zeitkonstanten anderer Bereiche unterscheidet. Dies hat jedoch keine Auswirkungen auf die Qualität der Modelle für die Anwendung zur Applikation stationärer Fahrzustände. Daher wurde die Auffälligkeit nicht näher untersucht. Auch etwaige Effekte des trägen Verhaltens der Fußraumtemperatur auf die ermittelte Standardabweichung des Fehlers wurden nicht berücksichtigt. Die Fehlerabschätzung könnte daher konservativ sein. Die größere Unsicherheit in der Vorhersage der Lufttemperatur im Fußraum war ausschlaggebend, um lediglich die Lufttemperaturen in Kopfhöhe für die Zielfunktion heranzuziehen.

4.3.3 Vergleich zur theoretischen Genauigkeit der Klimagerätmodelle

Sowohl für die Innenraumtemperaturen als auch für die Ausblastemperaturen wurden bereits bei der Erzeugung der Black-Box Modelle die Modellgenauigkeit ermittelt. Dazu wurde jeweils die Standardabweichung des Fehlers im Vergleich zum Validierungsset ermittelt. Während der Validierung der Modelle wurde wiederum die Standardabweichung der Fehler im Vergleich zu den Validierungsmessungen bestimmt. Tabelle 11 zeigt die jeweils ermittelten Werte für die Standardabweichungen. In Fällen wo eine bestimmte Größe nicht berechnet, sondern aus den Validierungsdaten ausgelesen wurde, war der Fehler 0.

Tabelle 11. Ermittelte Standardabweichungen der Fehler der einzelnen Temperaturen in K

Eigenschaft	Black-Box	KG	Innenraum	Regler-KG	KG-Innenraum	Gesamtmodell
sensTInnen(IESS)	5,0	0	2,9	0	2,1	1,2
sensTInnen(Tai)	6,3	0	1,9	0	2,1	1,1
TKopf(IESS)	5,9	0	1,3	0	1,5	1,3
TKopf(Tai)	5,0	0	1,8	0	2,2	1,9
TFuss(IESS)	5,1	0	3,3	0	2,9	3,0
TFuss(Tai)	4,7	0	3,3	0	3,0	3,2
SensTBelFa	3,9	2,0	0	1,2	2,1	2,3
sensTBelBf	4,2	0,9	0	1,1	0,9	2,3
sensTFussFa	4,5	1,6	0	0,3	1,6	1,4
sensTFussBF	5,2	1,5	0	0,3	1,5	1,5

Für alle betrachteten Fälle ist die Fehlerstandardabweichung am größten, wenn nur die Black-Box Modelle betrachtet werden. Die Standardabweichung liegt teilweise mehr als 300 % über den Werten aus anderen Konstellationen. Die größere Abweichung erklärt sich zum Teil aus den unterschiedlichen Validierungssets. Während die Black-Box Modelle auf der Basis von 100 Messungen des Versuchsplans validiert wurden, wurden alle anderen Kombinationen auf der Basis von 16 zufälligen Validierungsfahrten validiert.

Während das Black-Box Validierungsset auf der Basis eines raumfüllenden Versuchsplans zur Abdeckung des gesamten Betriebsspektrums erzeugt wurde, stellen die Validierungsfahrten nur einen kleinen Teil der möglichen Betriebspunkte dar. Einerseits wurden nur Aktuatorpositionen angefahren, die von der Regelung ausgewählt wurden, andererseits fanden die Validierungsfahrten im Frühjahr statt. Daher wird lediglich ein Außentemperaturbereich von etwa 3 °C bis 25 °C abgedeckt. Extremfälle sind in diesem Set nicht abgebildet. Des Weiteren sind die festgestellten Beharrungszustände während der Fahrt durch fluktuierende Außenbedingungen und das Eingreifen der Regelung weniger stationär als die Messpunkte des Validierungssets der Black-Box Modelle.

Der Einfluss wird deutlich, wenn die Black-Box Modelle mit der isolierten Betrachtung des Klimagerätmoduls verglichen werden. In beiden Fällen dienen die exakten Anforderungen der Regelung als Input und die Vorhersagen werden mit den gemessenen Ausblastemperaturen verglichen. Trotzdem ergibt sich ein erheblicher Unterschied der Genauigkeit. Es gibt mehrere Ursachen, die diesen Unterschied erklären können. Welche der aufgezählten Ursachen den Hauptteil der Abweichung erklärt kann auf dieser Datengrundlage nicht abschließend geklärt werden. Dazu wären weitreichendere Untersuchungen und Validierungsfahrten in allen Bereichen des Betriebsspektrums nötig. Aus zeitlichen Gründen konnten diese Fahrten nicht durchgeführt werden.

Eine Analyse der Abweichungen im Black-Box Validierungsfall legt jedoch nahe, dass die Limitierung der Fälle auf von der Regelung angesteuerte Betriebspunkte einen großen Anteil an der Verbesserung der Genauigkeit hat. Die hohe Standardabweichung bei der Black-Box Validierung wird von wenigen Ausreißern getrieben. Diese Ausreißer treten bei Betriebspunkten auf, die weit von plausiblen Betriebspunkten der Regelung liegen. Wenn diese Punkte aus der Validierung entfernt werden, sinkt die Standardabweichung der Fehler stark.

Ein weiteres Indiz ist, dass es keinen ähnlich starken Effekt gibt, wenn lediglich Validierungspunkte mit Außentemperaturen im Bereich von 3 °C bis 25 °C betrachtet werden. Eine Reduzierung der betrachteten Punkte hat ebenfalls nicht den ähnlichen Effekt. Es wird daher angenommen, dass die Validierungsfahrten ein geeignetes Maß zur Beurteilung der Modellqualität für die modellbasierte Applikation der Klimaregelung sind. Für weiterführende Untersuchungen wird jedoch die Bestätigung dieser Annahme durch das Aufzeichnen und Analysieren weiterer Validierungsfahrten im gesamten Betriebsbereich des Fahrzeugs empfohlen.

Aus den Ergebnissen wird außerdem deutlich, dass die Regelung die Abweichungen der geregelten Größen reduziert. Die Regelung hat also auch in der Simulation den gewünschten Effekt und kann zuverlässig Sollwerte für Temperaturen sicherstellen. Für alle Ausblastemperaturen erhöht sich die Genauigkeit, wenn Regelung und Klimagerät zusammen simuliert werden statt das Klimagerät isoliert zu simulieren. Derselbe Effekt ist für sensTInnen sichtbar, wenn das Gesamtmodell simuliert wird, statt die Innenraummodule isoliert zu betrachten.

Beim Vergleich der Innenraummodule auf Basis der IESS- und der Taitherm-Daten fällt auf, dass beide Varianten etwa gleich gute Werte liefern. Unter Betrachtung der Stichprobengröße sind die beobachteten Unterschiede hinsichtlich der Genauigkeit nicht signifikant.

5 Ergebnisse und Interpretation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der modellbasierten Applikation beschrieben. Sowohl die Ergebnisse der Simulationen als auch die Resultate der Validierungsfahrten werden dazu betrachtet. Die Betrachtung findet jeweils nach den in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen und in Tabelle 9 zusammengefassten drei Fällen statt. Weiterhin wird zwischen den Modellen auf Basis der IESS-Simulationsergebnisse und der Taitherm-Daten unterschieden.

5.1 Einfluss der Variablenanzahl

Es wurden Applikationen für drei unterschiedliche Fälle erzeugt. Diese Fälle unterscheiden sich in der Komplexität, indem sukzessive mehr Applikationsparameter zum Optimierungsset hinzugefügt wurden. Durch die zusätzlichen Applikationsparameter erhöht sich auch die Anzahl der Designvariablen, die optimiert werden. Jeder Stützpunkt der Applikationsparameter repräsentiert dabei eine Designvariable. Für den ersten Fall mit einer einzelnen Kennlinie ergeben sich sieben Designvariablen. Der zweite Fall mit einer zusätzlichen, vereinfachten Kennlinie kommt auf acht Designvariablen und der dritte Fall mit zwei zusätzlichen Kennfeldern wird in ein Optimierungsproblem mit 98 Designvariablen überführt.

Abbildung 60 zeigt die Optimierungsverläufe der drei Fälle mit dem Innenraummodul auf der Basis der IESS-Simulationsergebnisse. In dieser Abbildung ist für die drei Fälle der jeweils erreichte Wert der Zielfunktion für die einzelnen Iterationen geplottet. Für keinen der drei Fälle konnte das Konvergenzkriterium erreicht werden. Das Abbruchkriterium für die maximale Laufzeit von etwa 5 Tagen wurde vorher erreicht und hat die Optimierung beendet. Trotz der identischen Laufzeit der Simulationen unterscheiden sich die Anzahl der erreichten Iterationen. Die ist mit unterschiedlichen Laufzeiten der Simulationen durch die verschiedenen Simulationsverläufe und unterschiedlicher Computerauslastung zu erklären.

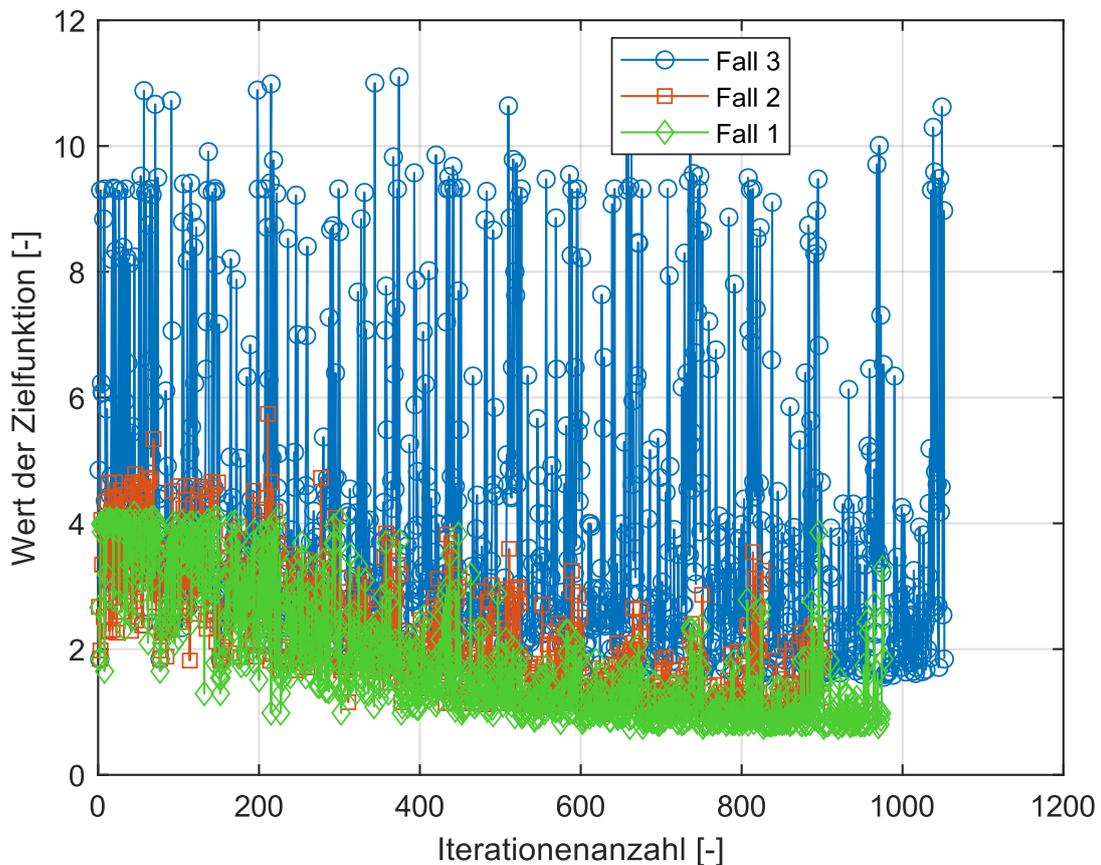


Abbildung 60. Vergleich der Konvergenzverläufe für die drei Optimierungsfälle

Bei der Betrachtung der Verläufe fällt auf, dass mit steigender Anzahl der Designvariablen die Konvergenzgeschwindigkeit abnimmt. Der Wert der Zielfunktion nimmt weniger stark ab und endet dementsprechend in der gegebenen Zeit in einem höheren Wert. Durch die zusätzlichen Freiheitsgrade ist zu erwarten, dass die Optimierungen mit mehr Designvariablen niedrigere Werte der Zielfunktion erreichen können. Dies konnte jedoch nicht beobachtet werden. Dies ist ein klares Zeichen, dass die Optimierungen noch nicht konvergiert sind. Es besteht daher weiteres Verbesserungspotenzial bei der Optimierungsmethodik. Des Weiteren wurde beobachtet, dass die Streuung der erreichten Werte der Zielfunktion mit steigender Anzahl an Designvariablen zunimmt.

5.2 Applikationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Optimierungen und die Ergebnisse der jeweiligen Validierung präsentiert. Dies wird nacheinander für die drei untersuchten Fälle getan. Zunächst werden die Ergebnisse, die mit dem Modell, das auf der Basis der IESS-Simulationsergebnissen trainiert wurde, präsentiert. Dieses Modell wird im Folgenden zur Vereinfachung als IESS-Modell bezeichnet. Im Anschluss werden die entsprechenden Ergebnisse des anderen Modells präsentiert. Dieses wurde mit

Simulationsergebnissen der Taitherm-Simulationen trainiert und wird daher als Taitherm-Modell bezeichnet.

5.2.1 IESS-Modell

Zunächst werden die Ergebnisse, die mit dem IESS-Modell erzeugt wurden, präsentiert. Dazu werden nacheinander die Ergebnisse für die drei Fälle gezeigt.

5.2.1.1 Fall 1

Beim ersten Fall wurde lediglich eine einzelne Kennlinie betrachtet. Der Wert der Zielfunktion konnte auf 0,7 reduziert werden. Der entsprechende Wert für die Serienapplikation wurde in der Simulation zu 1,8 bestimmt. Zunächst zeigt Abbildung 61 die Veränderung der Applikationskennlinie während der Optimierung. Dazu sind der Startpunkt der Optimierung, das Ergebnis sowie die Serienapplikation gezeigt. Der hellgrüne Bereich zeigt die Spannweite, die in konventionell applizierten Fahrzeugen Verwendung findet. Der graue Bereich zeigt den erlaubten Suchbereich des Algorithmus.

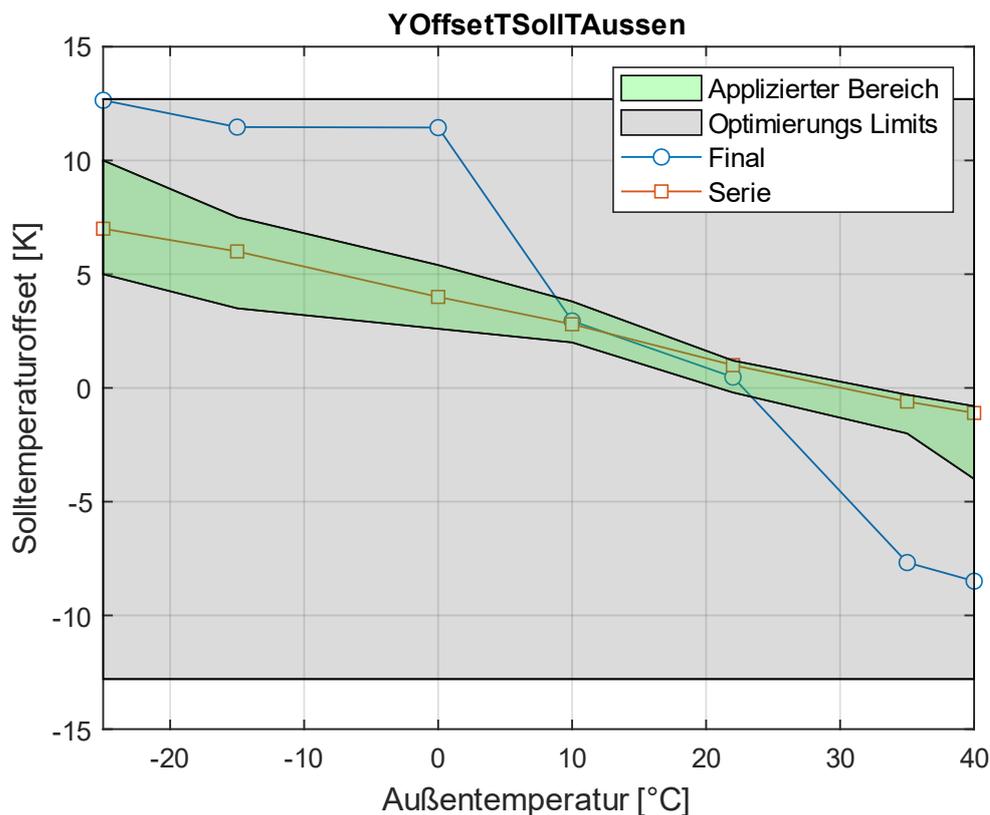


Abbildung 61. Veränderung der Applikationskennlinie durch die Optimierung

Die erzeugte Kennlinie unterscheidet sich deutlich von der Serienapplikation und liegt zu großen Teilen außerhalb des Bereichs, der von den konventionellen Applikationen abgedeckt wird. Lediglich im Bereich der Stützpunkte vier und fünf liegt das Ergebnis sehr nah am Serienstand. Diese Stützpunkte wirken bei Außentemperaturen von 10 °C bzw. 22 °C.

Zur Bewertung der Ergebnisse wird Abbildung 62 verwendet. Dort wird ein Histogramm der jeweils erreichten Zielwerte gezeigt. Sowohl die Verteilung für den initialen Fall als auch für die Serienapplikation und das Ergebnis der Optimierung werden gezeigt.

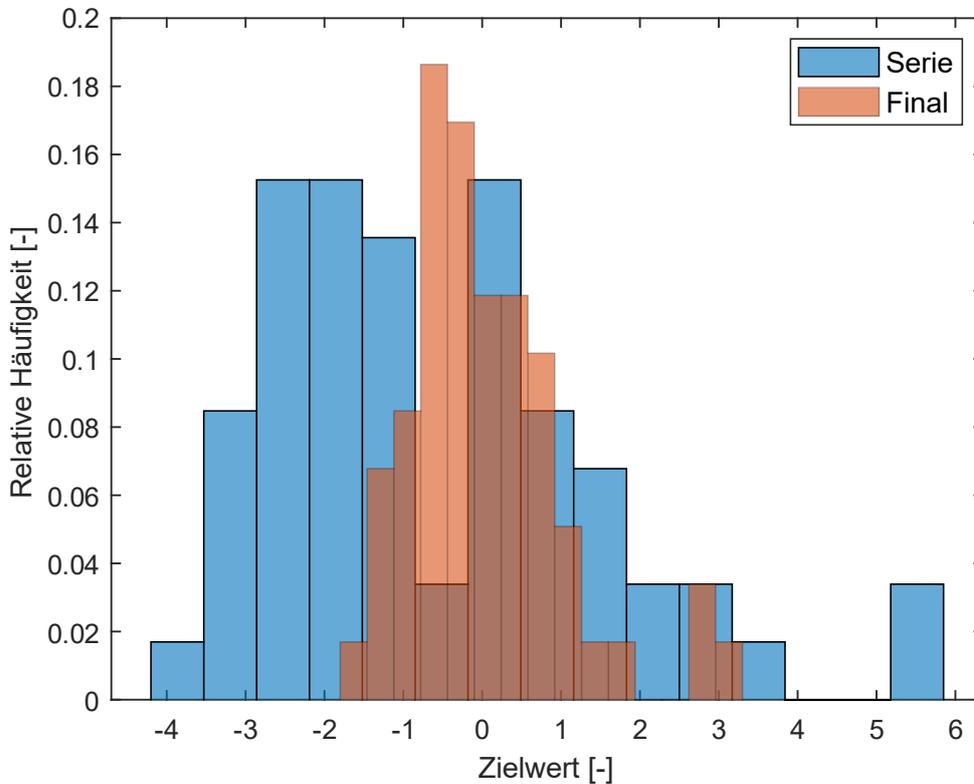


Abbildung 62. Histogramm der erreichten Zielwerte für die relevanten Betriebspunkte

Es zeigt sich, dass die Streuung des Optimierungsergebnisses deutlich geringer ist. Außerdem ist der Mittelwert nahe bei null, während er für die Serienapplikation etwa -1 beträgt. Dies zeigt, dass die Optimierung den erreichten Zielwert in der Simulation über alle Betriebspunkte hinweg deutlich reduzieren konnte.

Dieser Befund wird von Abbildung 63 bestätigt. Dort sind die simulierten Verläufe der Lufttemperatur in Kopfhöhe gezeigt. Dabei sind sowohl für die Initialapplikation als auch für die optimierte Applikation und die Serienapplikation jeweils die Temperaturen auf der Fahrer- und Beifahrerseite abgebildet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind lediglich die ersten fünf Betriebspunkte dargestellt.

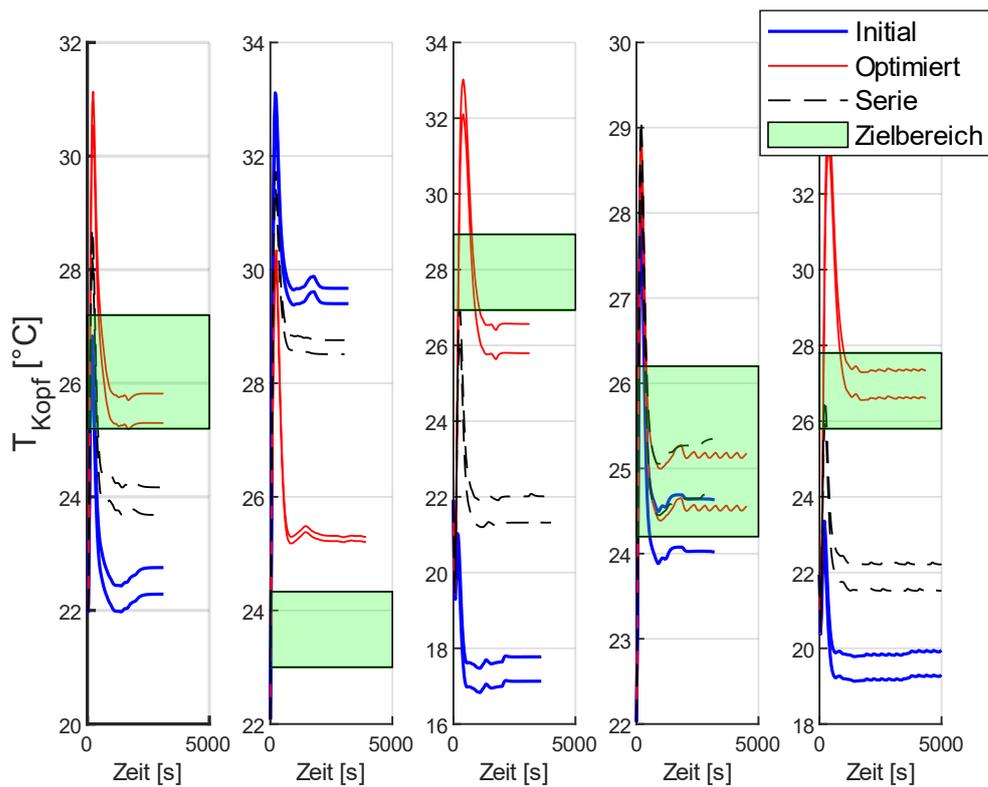


Abbildung 63. Verlauf der simulierten Temperaturen für fünf ausgewählte Betriebspunkte

Der grüne Bereich zeigt jeweils den vorgegebenen Zielbereich an. Für jeden der untersuchten Betriebspunkte liegt die erreichte Gleichgewichtstemperatur näher an dem Zielbereich. Dies deckt sich mit den Beobachtungen aus Abbildung 62. Es zeigt sich, dass sowohl bei der initialen Applikation als auch bei der optimierten Applikation die Temperaturen meistens etwas zu niedrig sind. Auch dies deckt sich mit den Beobachtungen aus Abbildung 62.

Neben den Auswertungen der Simulationsergebnisse, wurde die erzeugte Applikation auch im Fahrversuch bewertet. Die gewählte Methode ist mit einer Vielzahl an Problemen behaftet, erlaubt jedoch trotzdem eine Einschätzung der Qualität der erzeugten Applikationen.

Abbildung 64 zeigt die gemessenen Kopfhöhentemperaturen für die beiden Applikationen. Um den Einfluss fluktuierender Außenbedingungen zu minimieren, wurden jeweils zwei Fahrten mit beiden Applikationen in wechselnder Reihenfolge durchgeführt.

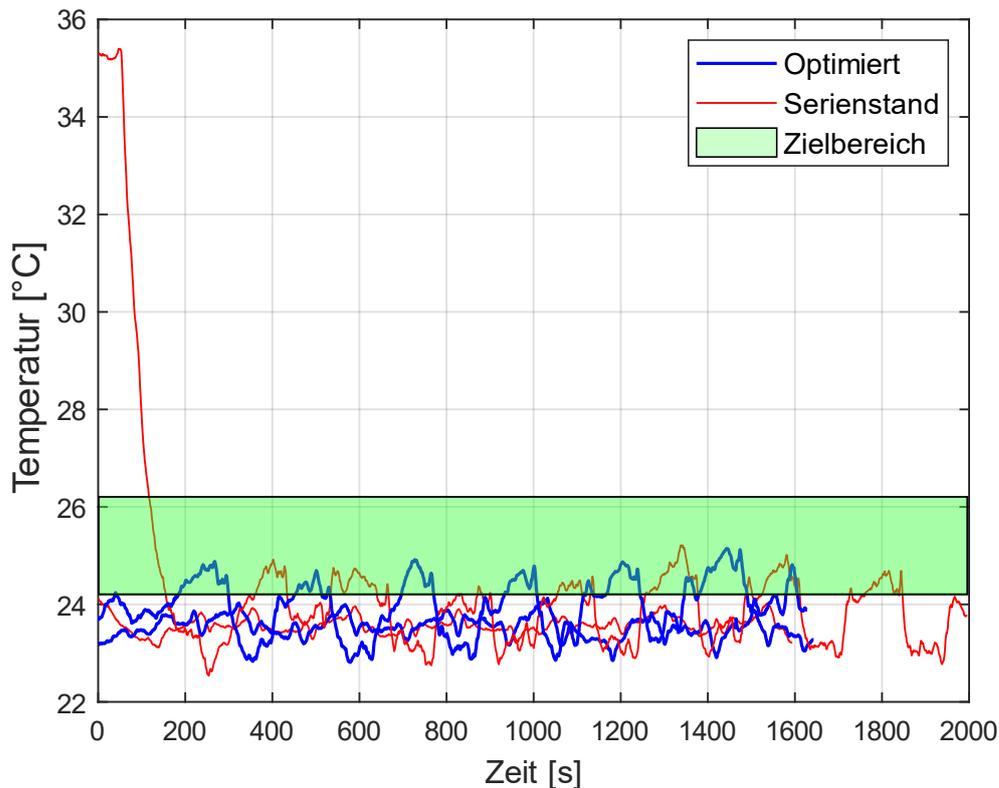


Abbildung 64. Vergleich der gemessenen Kopfhöhentemperatur für die Serienapplikation und die optimierte Applikation

Es wird deutlich, dass die beiden Ergebnisse sehr ähnlich sind. Es muss jedoch angemerkt werden, dass durch die Außentemperatur während der Validierung hauptsächlich Stützpunkt vier für das Verhalten verantwortlich war. Da die Werte dieses Stützpunktes sehr ähnlich sind, wurde auch ein sehr ähnliches Verhalten der beiden Applikationen erwartet. Dies zeigt auch die Limitierungen der gewählten Validierungsmethode auf. Es kann jeweils nur das Verhalten während eines einzelnen Betriebspunktes validiert werden.

Für die ausgewählte Kennlinie lassen sich jedoch die Auswirkungen der Änderungen auf das Regelungsverhalten abschätzen. Ein höherer Wert führt zu höheren Temperaturen im Fahrzeug. Aus Abbildung 61 lässt sich schließen, dass die Optimierungsergebnisse für Außentemperaturen unter 20 °C zu höheren Temperaturen und für Außentemperaturen über 35 °C zu niedrigeren Temperaturen als der Serienstand führt. In vorausgehenden Testfahrten mit dem Serienstand wurde herausgefunden, dass die Lufttemperaturen für kalte Außentemperaturen zu niedrig und für warme Außentemperaturen zu hoch sind. Prinzipiell beseitigt die optimierte Applikation diesen Mangel. Wie gut dies gelingt kann anhand der Validierungsergebnisse jedoch nicht bestimmt werden. Um diesen Beweis zu erbringen sind weitere Vergleichsfahrten notwendig.

5.2.1.2 Fall 2

Im zweiten Fall wurde zusätzlich noch eine zweite Kennlinie optimiert. Zur Bewertung wurde dieselbe Methodik wie für den ersten Fall verwendet. In diesem Fall konnte der Wert der Zielfunktion von 1,8, dem Wert der Serienapplikation, auf 0,9 reduziert werden. Die Verbesserung der Ergebnisse fällt daher weniger stark aus als noch in Fall 1.

Abbildung 65 zeigt die Veränderung der ersten Kennlinie während der Optimierung. Die Veränderung der zweiten Kennlinie wird in Abbildung 66 gezeigt.

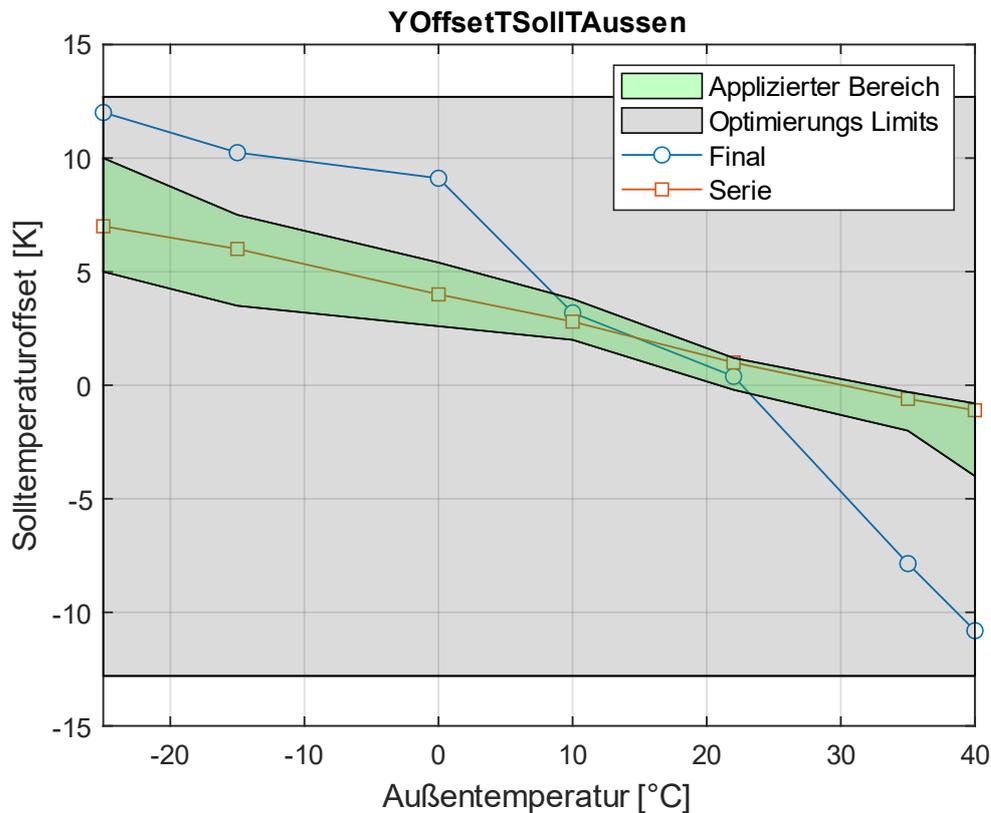


Abbildung 65. Veränderung der ersten Kennlinie während der Optimierung

Die resultierende erste Kennlinie ähnelt dem Ergebnis des ersten Falles sehr stark. Wiederum ist die resultierende Kennlinie im Bereich der ersten drei Stützpunkte deutlich oberhalb der Serienapplikation und des üblichen Bereichs. Im Bereich der Stützpunkte vier und fünf ist sie sehr nahe am Serienstand und im Bereich der Stützpunkte sechs und sieben deutlich unterhalb des üblichen Bereichs. Insbesondere im Bereich des letzten Stützpunktes ist der Offset noch stärker negativ. Bei hohen Außentemperaturen im Bereich von 40 °C ist daher von einer stärkeren Kühlung auszugehen.

Die Veränderung der zweiten Kennlinie wird in Abbildung 66 gezeigt. Bei dieser Kennlinie wurde lediglich der dritte Stützpunkt geändert. Da in den Simulationen lediglich eine neutrale Schichtungseinstellung von 50 % berücksichtigt wurde, haben die anderen Stützpunkte keine Auswirkung auf das Verhalten der Regelung gezeigt. Zur Vereinfachung wurden diese Stützpunkte daher von der Optimierung

ausgenommen. Durch die Optimierung wurde der neutrale Schichtungswert von 0 K auf etwa 3,5 K erhöht. Dies führt zu einer Anhebung des Sollwertes für die Ausblastemperatur der Belüftungsebene um 3,5 K.

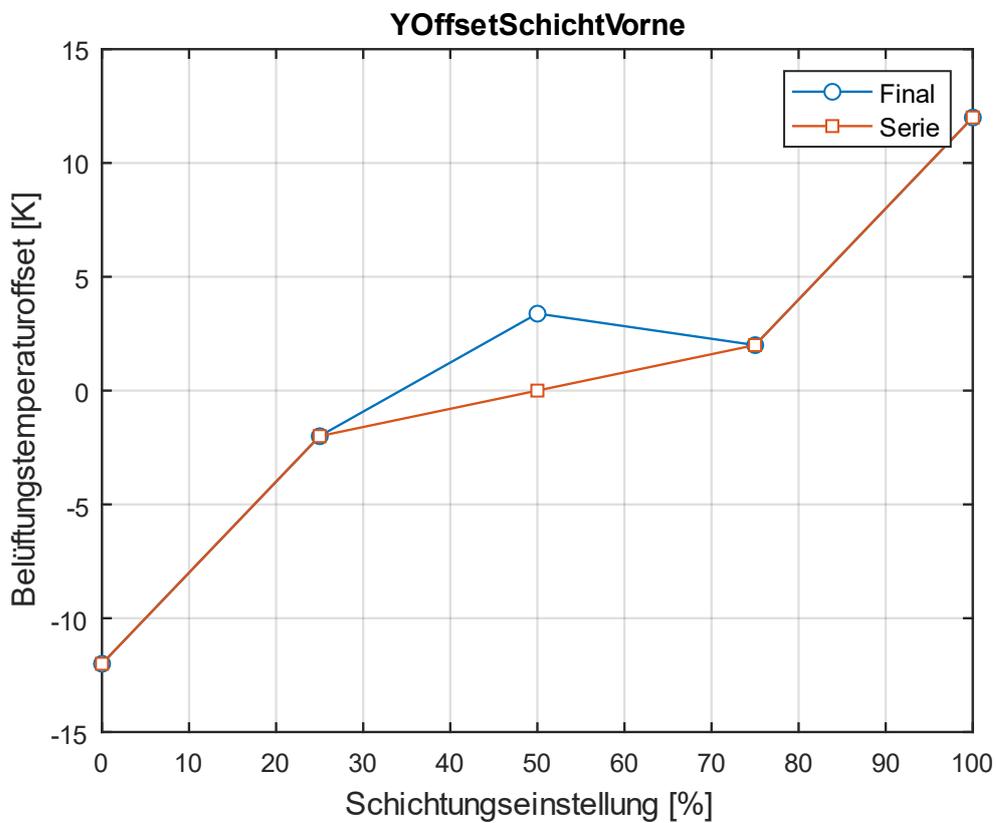


Abbildung 66. Veränderung der zweiten Applikationskennlinie nach der Optimierung

Abbildung 67 zeigt ein Histogramm der erreichten Zielwerte bei den einzelnen Betriebspunkten. Die Verteilung der optimierten Applikation weist wiederum eine deutlich geringere Streuung als die des Serienstands auf und ist besser zentriert. Es existieren jedoch auch einzelne Betriebspunkte bei denen die Zielfunktion einen Wert von -2 oder 4 erreicht. Dies korrespondiert mit der Beobachtung eines deutlich verringerten Wertes für die Zielfunktion nach der Optimierung.

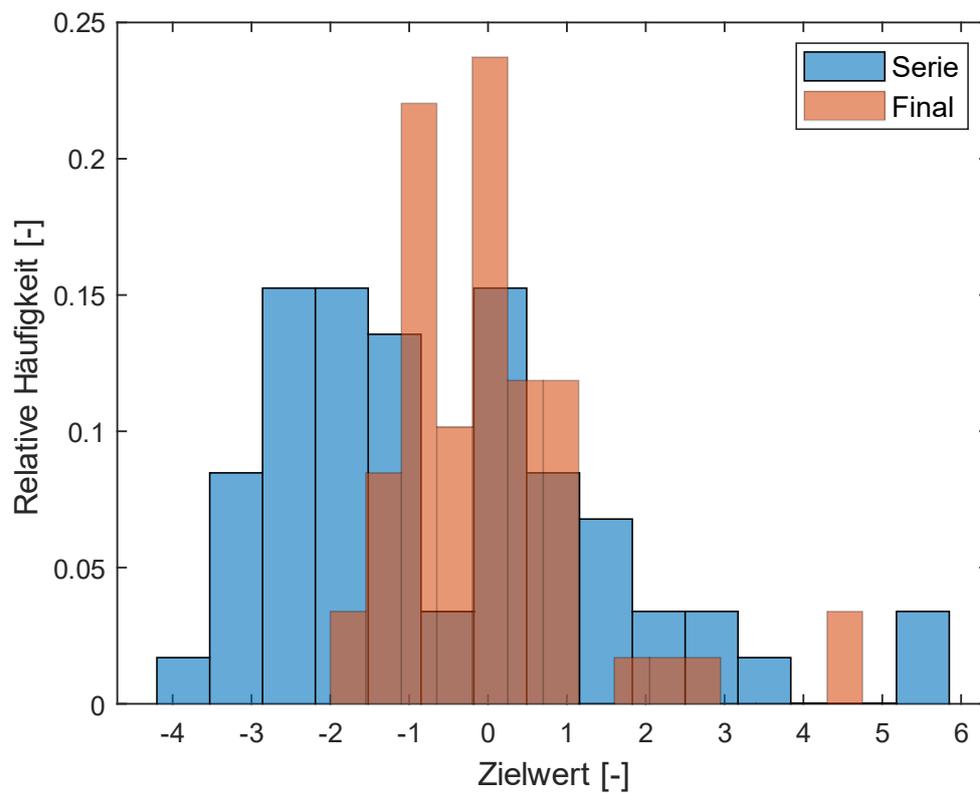


Abbildung 67. Histogramm des erreichten Zielwertes je einzeltem Betriebspunkt.

Zur Validierung dieser simulativen Ergebnisse wurde eine Validierungsfahrt durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Validierungsfahrt werden in Abbildung 68 gezeigt.

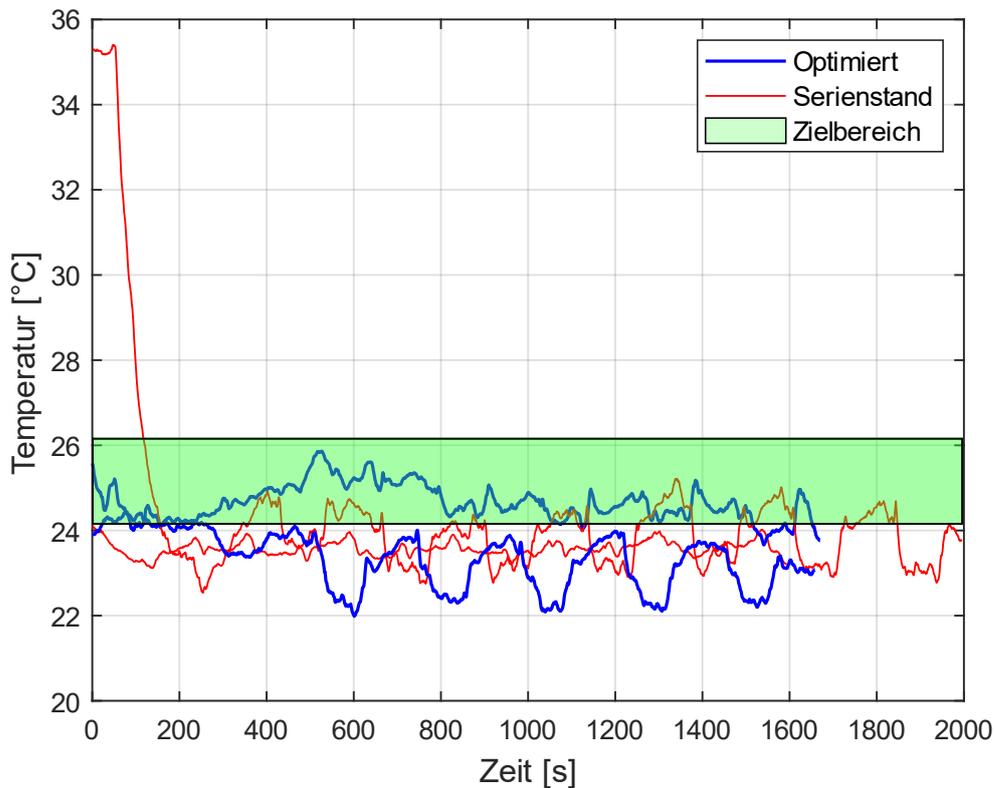


Abbildung 68. Vergleich der gemessenen Innenraumtemperaturen

Sowohl für die Serienapplikation als auch für die für optimierte Applikation befinden sich die gemessenen Lufttemperaturen innerhalb des Zielbereichs oder im Bereich bis zu 2 K unterhalb des Zielbereichs. Zwischen den beiden Applikationen können lediglich kleinere Unterschiede identifiziert werden. Diese liegen jedoch in einem Bereich, der auch auf Fluktuationen in den Außenbedingungen zurückgeführt werden kann.

5.2.1.3 Fall 3

Im dritten Fall wurden zusätzlich zu den beiden Kennlinien auch zwei Kennfelder optimiert. Wiederum wurde dieselbe Methodik zur Bewertung der Ergebnisse verwendet. In diesem Fall konnte der Wert der Zielfunktion vom Ausgangswert 1,8 geringfügig auf 1,6 gesenkt werden.

Durch den größeren Umfang der Optimierung, müssen für diesen Fall auch mehr Ergebnisse gezeigt werden. Abbildung 69 zeigt die Veränderung der ersten Kennlinie. Die Veränderung der zweiten Kennlinie wird in Abbildung 70 gezeigt. Die Veränderung des ersten Kennfeldes für die Solltemperatur der Belüftungsebene wird in Abbildung 71 gezeigt. Abbildung 72 zeigt die Veränderung des zweiten Kennfeldes für die Fußebene.

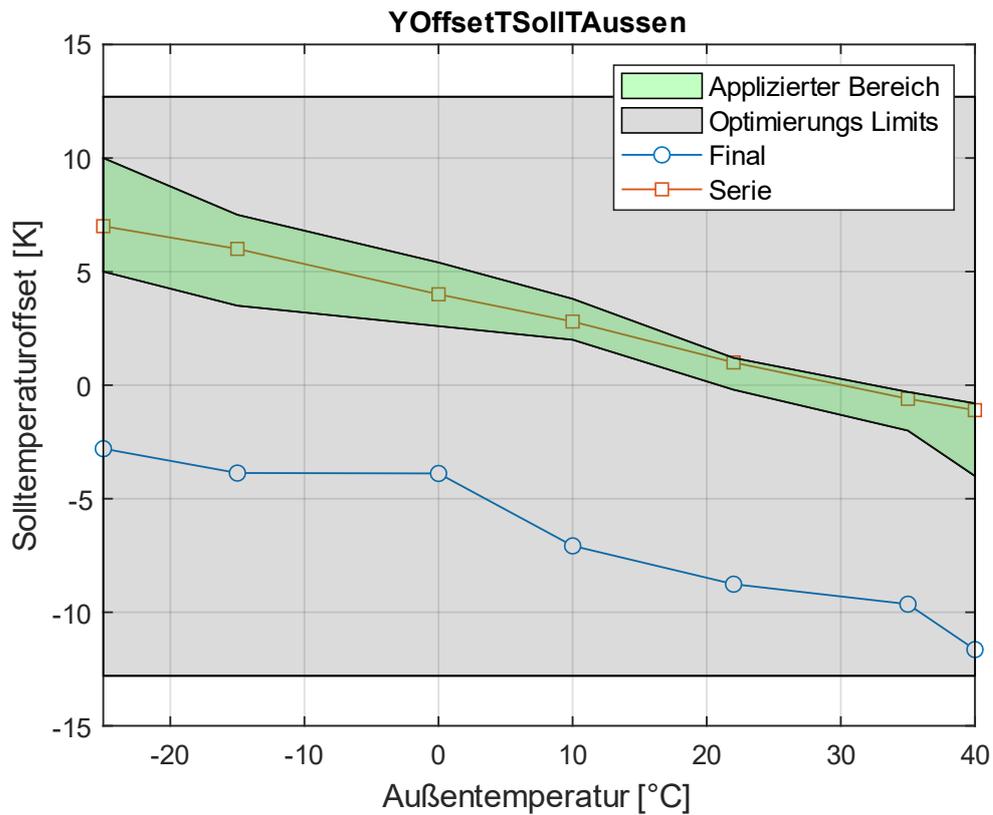


Abbildung 69. Veränderung der ersten Kennlinie während der Optimierung

Die erste Kennlinie gibt den Offset der Solltemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur an. Die orange Linie zeigt den Verlauf in der Serienapplikation an und die blaue Linie den Verlauf in der optimierten Applikation. Beide Varianten haben einen ähnlichen Verlauf. Allerdings verläuft die optimierte Kennlinie etwa 10 K unterhalb des Serienstands. Dieser Verlauf führt zu deutlich niedrigeren Sollwerten für die Innenraumtemperatur.

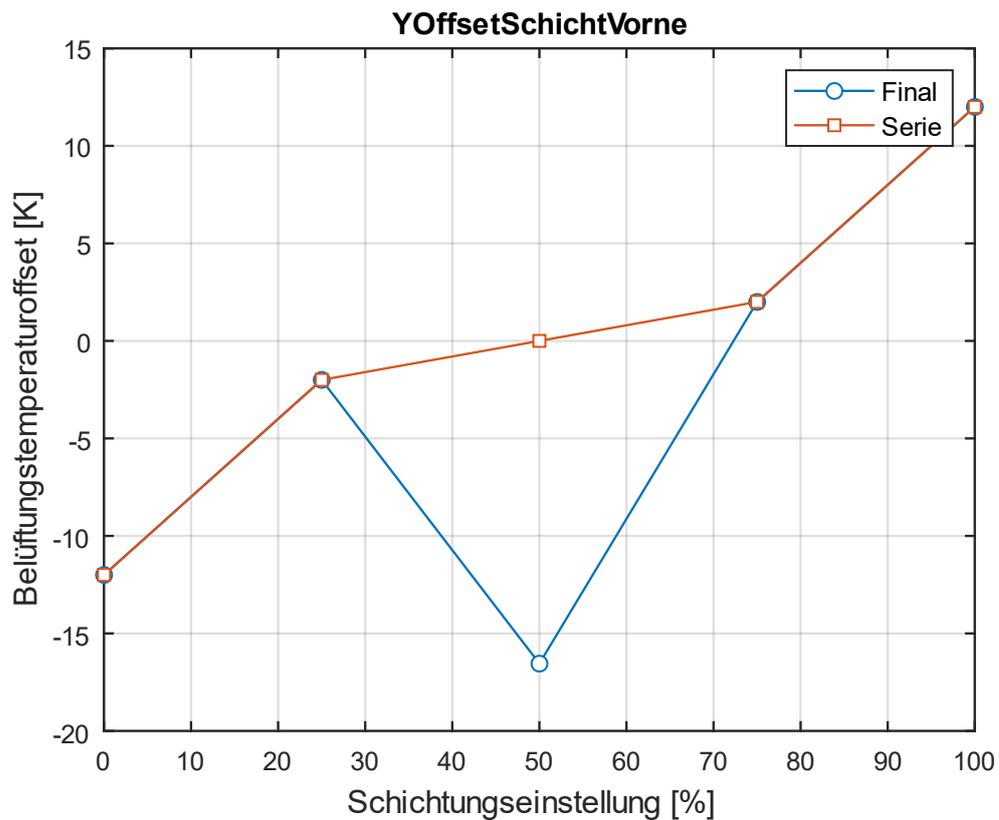


Abbildung 70. Veränderung der zweiten Kennlinie durch die Optimierung

Die zweite Kennlinie bestimmt den Schichtungsoffset in Abhängigkeit von der Schichtungseinstellung. Dieser Wert wird auf den Sollwert für die Ausblastemperatur der Belüftungsebene addiert. Da in der Optimierung lediglich eine Schichtungseinstellung von 50 % berücksichtigt wurde, wurde auch nur der entsprechende Stützpunkt optimiert. Dies vereinfachte das Optimierungsproblem. In der optimierten Kennlinie ist der neutrale Stützpunkt etwa 17 K nach unten verschoben. Dies löst eine deutliche Abkühlung der Solltemperatur in der Belüftungsebene aus.

Die beiden optimierten Kennfelder, die in Abbildung 71 und Abbildung 72 gezeigt werden, zeichnen sich durch recht konstante Werte aus. Die leicht durchsichtigen Flächen stellen den Serienstand dar. Im Serienstand ist eine deutliche Steigung der Werte in der Dimension der Hauptstellgröße Y erkennbar. Diese Steigung ist in den optimierten Kennfeldern nicht vorhanden. Bis auf kleinere lokale Fluktuationen sind die Werte sehr konstant. Die Werte liegen dabei im oberen Bereich der Bandbreite des Serienstandes. Daher können bei den optimierten Kennfeldern durchschnittlich höhere Ausblastemperaturen sowohl für die Belüftungs- als auch für die Fußebene erwartet werden.

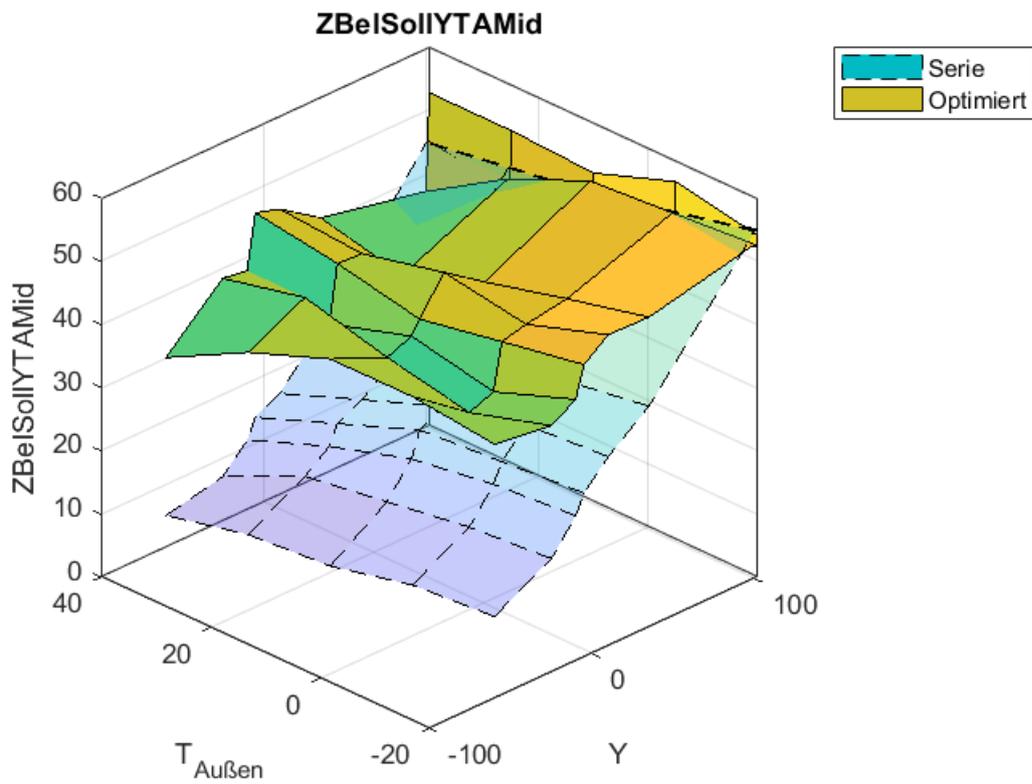


Abbildung 71. Veränderung des ersten Kennfeldes durch die Optimierung

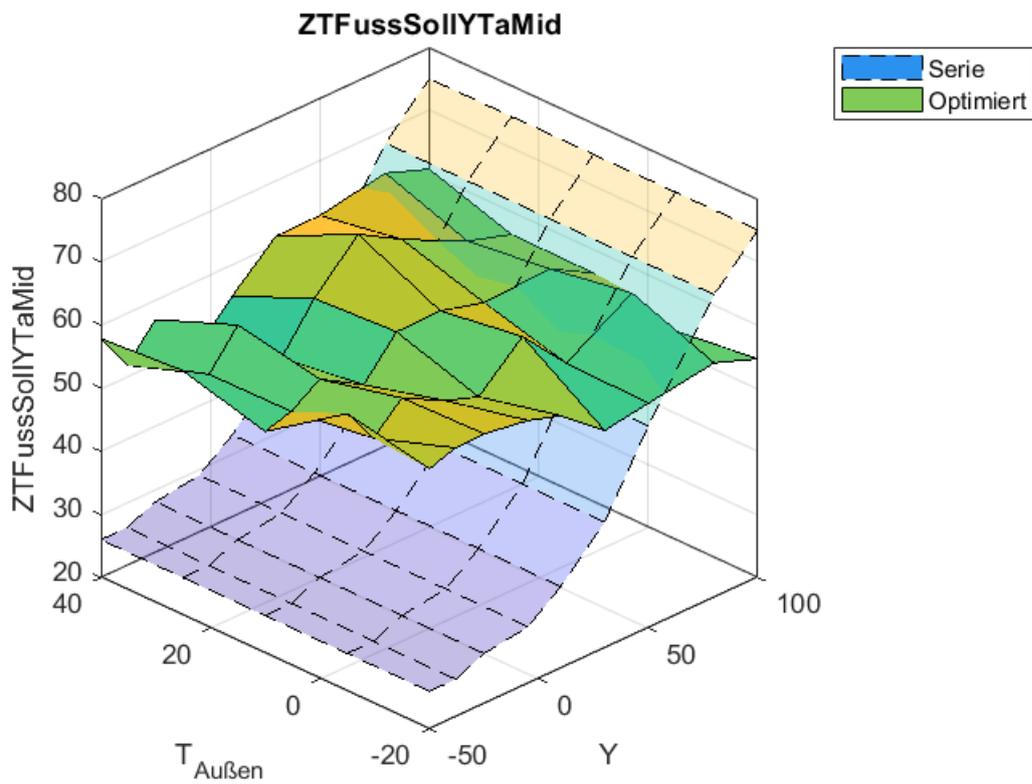


Abbildung 72. Veränderung des zweiten Kennfeldes durch die Optimierung

Wie bei den anderen beiden Fällen, zeigt Abbildung 73 ein Histogramm der erreichten Zielwerte der einzelnen Betriebspunkte. Wie bei den ersten beiden Fällen ist auch in diesem Fall die Verteilung besser zentriert. Die Streuung ist ebenfalls geringer. Der Unterschied zwischen Serienstand und optimierter Applikation ist jedoch deutlich geringer als in den ersten beiden Fällen. In dem Histogramm sind auch einige Ausreißer mit Werten von über 6 zu erkennen. Dies deutet auf eine geringere Verbesserung des Regelverhaltens hin.

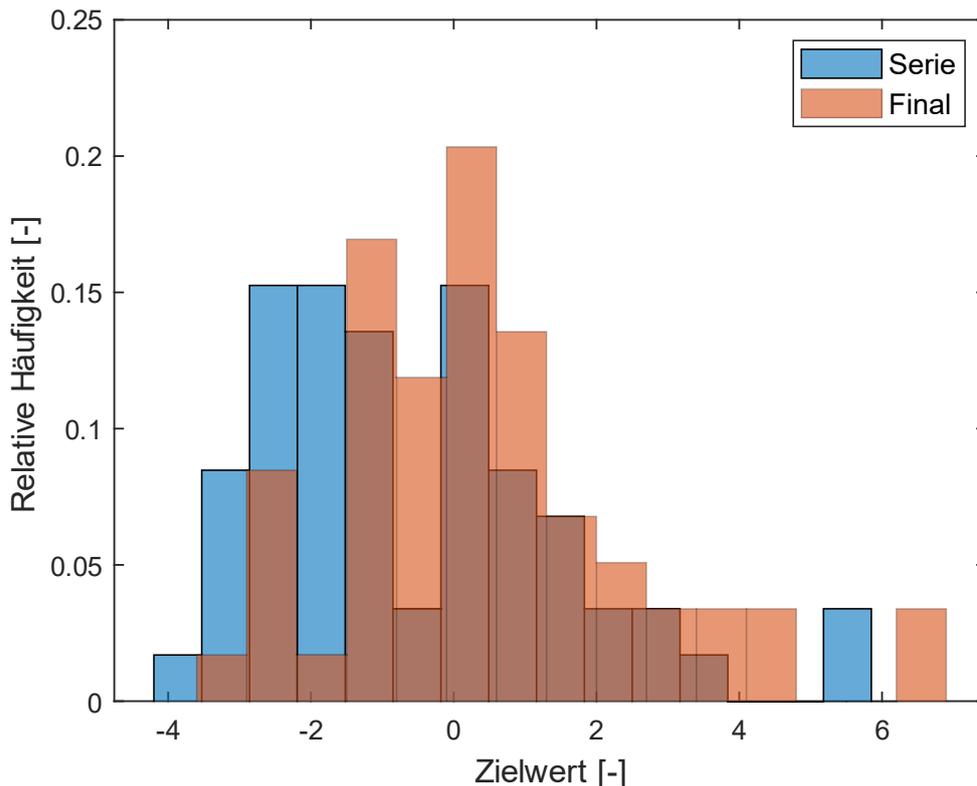


Abbildung 73. Histogramm der erreichten Zielwerte

Die Ergebnisse des Validierungsversuchs werden in Abbildung 74 gezeigt. Für die beiden Fahrten mit dem Serienstand bewegen sich die gemessenen Temperaturen knapp unterhalb des Zielbereichs. Bei der Fahrt mit der optimierten Applikation startet die Innentemperatur knapp unterhalb des Zielbereichs und steigt dann kurzfristig stark an. Danach fällt die Temperatur wieder ab und pendelt sich mit einem kleinen Unterschwinger leicht unterhalb, bzw. teilweise knapp innerhalb des Zielbereichs ein. Im Hinblick auf die Zielfunktion sind die beiden Applikationen von sehr ähnlicher Qualität. Im akustischen Verhalten unterscheiden sich die optimierte Applikation und der Serienstand jedoch deutlich. Bei der optimierten Applikation kommt es zu einer deutlich höheren Gebläseleistung und damit zu einem unangenehmen akustischen Verhalten. Die hohe Gebläseleistung ist ebenfalls in den Temperaturverläufen zu erkennen. Dort erzeugt die hohe Luftmenge die sehr abrupten Temperaturänderungen zu Beginn der Messung. Die Akustik hat keinen Einfluss auf die Zielfunktion. Dieses Ergebnis verdeutlicht jedoch nochmals den Bedarf für eine umfassendere Zielfunktion für einen praktischen Einsatz der modellbasierten Applikation im Klimatisierungssystem.

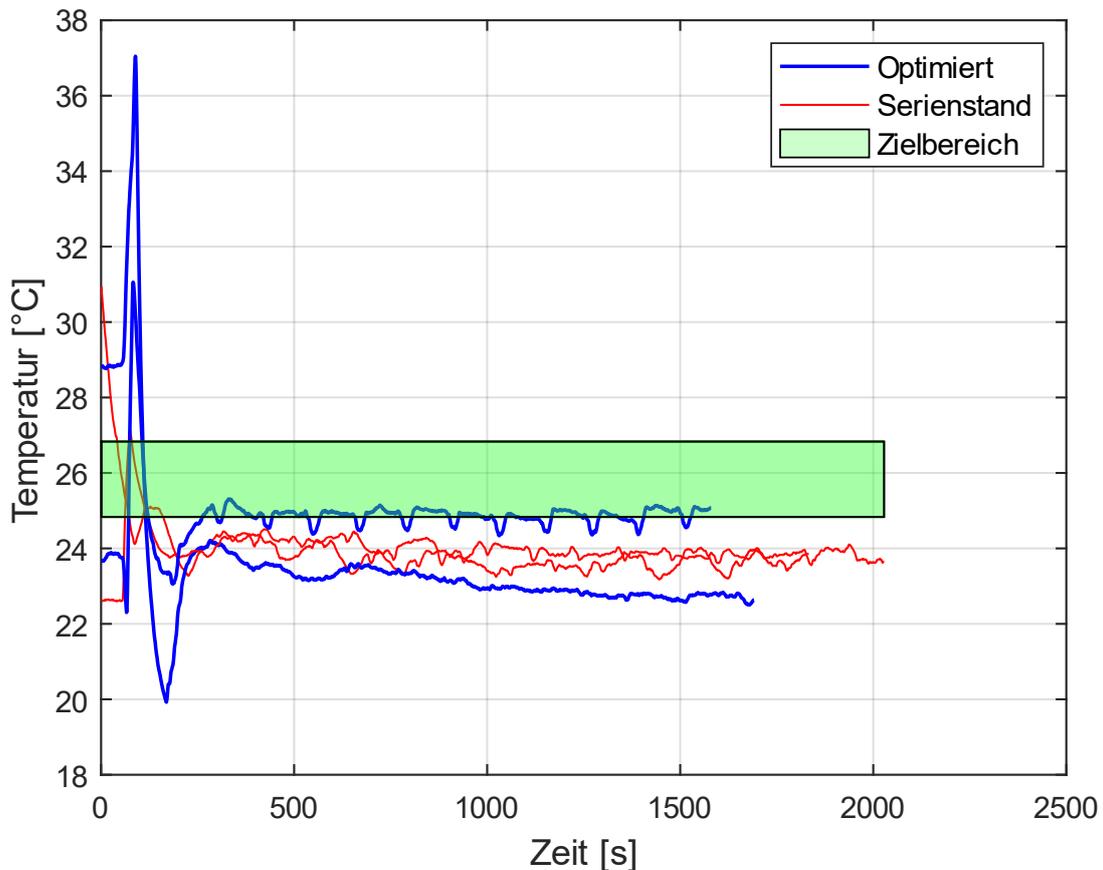


Abbildung 74. Vergleich der gemessenen Innenraumtemperaturen in Kopfhöhe

Trotz der unterschiedlichen Applikationsparameter nach der Optimierung ist das thermische Verhalten dem des Serienstands sehr ähnlich. Dies ist erklärbar, da sich die Änderungen der einzelnen Applikationsparameter teilweise gegenseitig aufheben. Der niedrige Wert für den Schichtungsoffset in Abbildung 70 führt effektiv zu einer deutlichen Verschiebung nach unten für das Kennfeld aus Abbildung 71. Durch den stark negativen Offset auf die Solltemperatur aus Abbildung 69 ergeben sich sehr niedrige Solltemperaturen. Die Regelung der Innenraumtemperatur wird über einen P-Regler realisiert. Daher kann es zu einem bleibenden Offset bei der Innenraumtemperatur kommen. Dieser Offset wird maßgeblich über die Kennfelder aus Abbildung 71 und Abbildung 72 sowie einem Kennfeld für die Gebläseleistung bestimmt. Durch die extrem niedrige Solltemperatur erreicht die Regelung für die Innenraumtemperatur zudem ihren Minimalwert für die Hauptstellgröße Y. Dieser Wert beträgt durchgängig -100 und signalisiert maximale Abkühlung, was zu der hohen Gebläseleistung führt.

Aus den beiden Kennfeldern für die Ausblastemperaturen sind lediglich die Werte für $Y=-100$ relevant. Diese bedeuten für die Belüftungsebene Werte zwischen 30 °C und 40 °C. Von diesen Werten wird jedoch noch der Schichtungsoffset abgezogen. Der Rest des Kennfeldes hat keinen Einfluss. Durch dieses Verhalten hätte eine andere Nutzereingabe für die Wunschtemperatur ebenfalls keinen Einfluss. Während dieses Verhalten in der Zielfunktion nicht berücksichtigt wird, ist es in der Praxis jedoch nicht erwünscht.

5.2.2 Taitherm-Modell

Die Optimierungen der drei Fälle wurden ein weiteres Mal ausgeführt. Diesmal wurde das Innenraummodul auf Basis der Taitherm-Simulationsergebnisse verwendet. Die restlichen Einstellungen wurden nicht geändert und sind demnach gleichgeblieben.

5.2.2.1 Fall 1

Für den ersten Fall wurde die Kennlinie des Solltemperaturoffsets in Abhängigkeit von der Außentemperatur isoliert betrachtet. Bei dieser Optimierung konnte der Wert der Zielfunktion von 1,6 auf 0,6 reduziert werden. Durch den Unterschied im verwendeten Innenraummodul ergibt sich ein neuer Referenzwert für die Serie. Die Veränderung der optimierten Kennlinie wird in Abbildung 75 gezeigt. Die optimierte Kennlinie ist in blau abgebildet und die Kennlinie des Serienstands in orange. Der grüne Bereich zeigt die Variation des Serienstands zwischen den verschiedenen Fahrzeugmodellen. Der graue Bereich zeigt den Bereich, der dem Optimierer zur Verfügung stand.

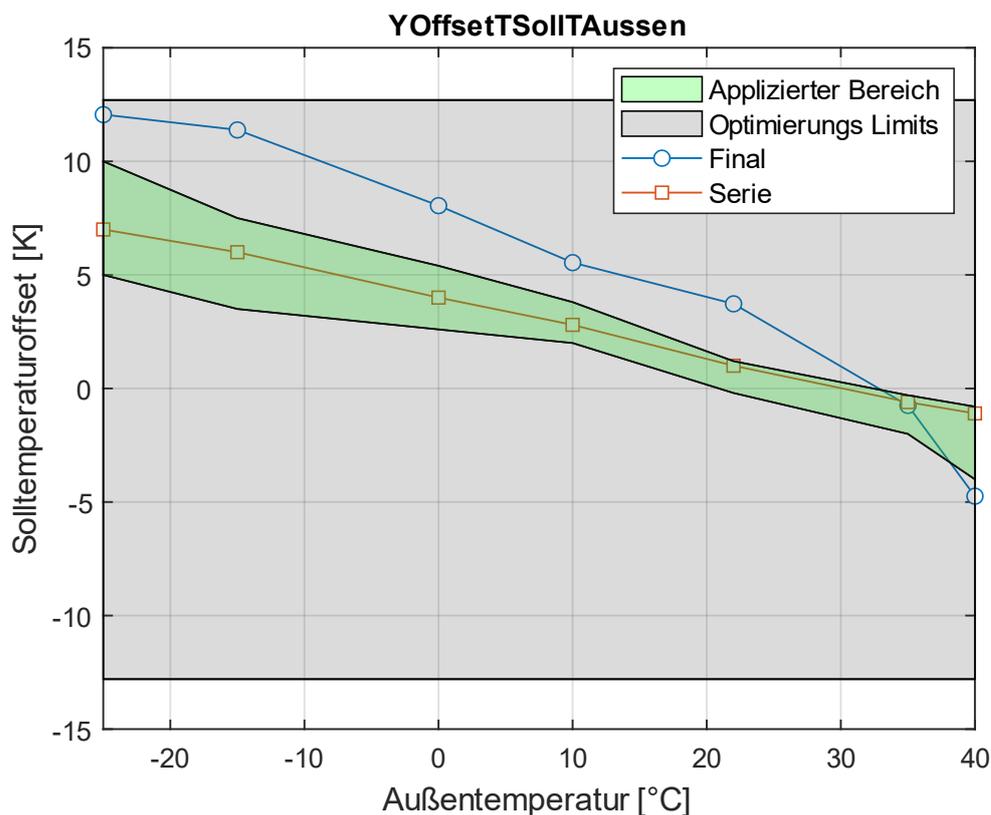


Abbildung 75. Veränderung der Kennlinie durch die Optimierung

Die optimierte Kennlinie befindet sich größtenteils oberhalb der Serienapplikation und auch oberhalb des grünen Bereichs. Dieser Bereich gibt die Spannweite an, die für diese Kennlinie über die gesamte Modellpalette in der Serienapplikation vorkommt. Lediglich im Bereich der hohen Außentemperaturen (>35 °C) sinkt die optimierte Kennlinie unter die Serienversion.

Durch diese Veränderungen konnte in der Simulation ein deutlich besserer Zielwert der Applikation erreicht werden. Abbildung 76 zeigt ein Histogramm der erreichten Zielpunkte bei den verschiedenen Betriebspunkten.

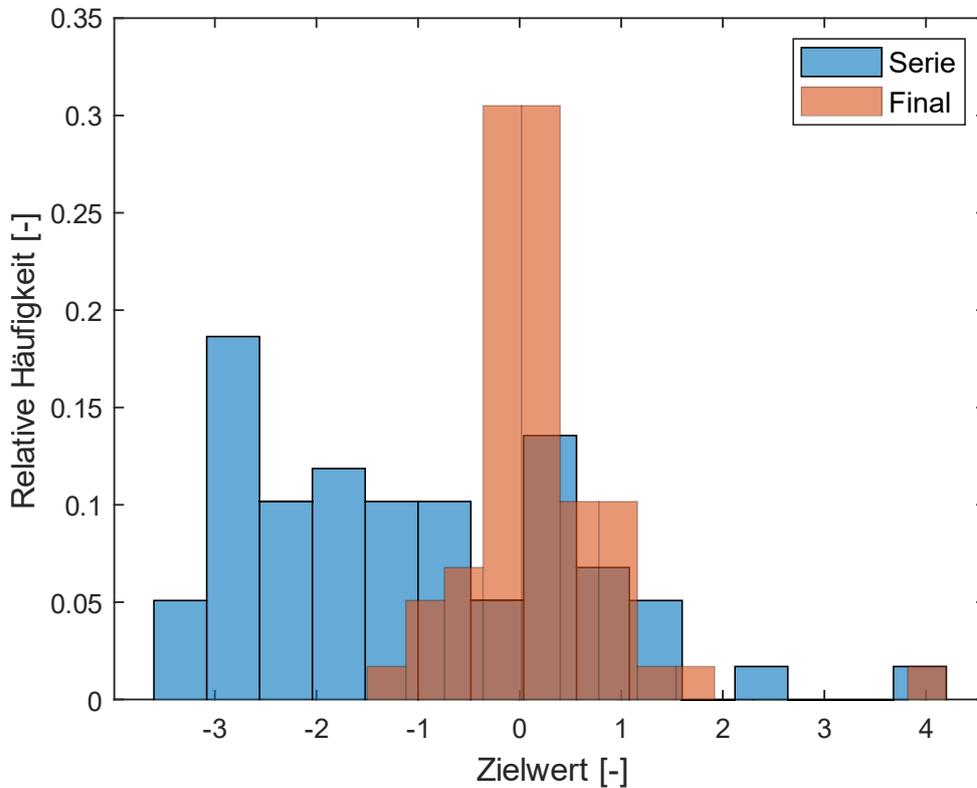


Abbildung 76. Histogramm der Zielwerte der einzelnen Betriebspunkte

Das Histogramm der finalen Applikation ist deutlich zentrierter und auch der Mittelwert hat sich von einem negativen Wert zum Nullpunkt verschoben. Es gibt jedoch auch einen Ausreißer mit einem Wert von 4. Um diese Ergebnisse bestätigen zu können, wurde eine Validierungsfahrt durchgeführt. Die Ergebnisse der Validierungsfahrt werden in Abbildung 77 gezeigt.

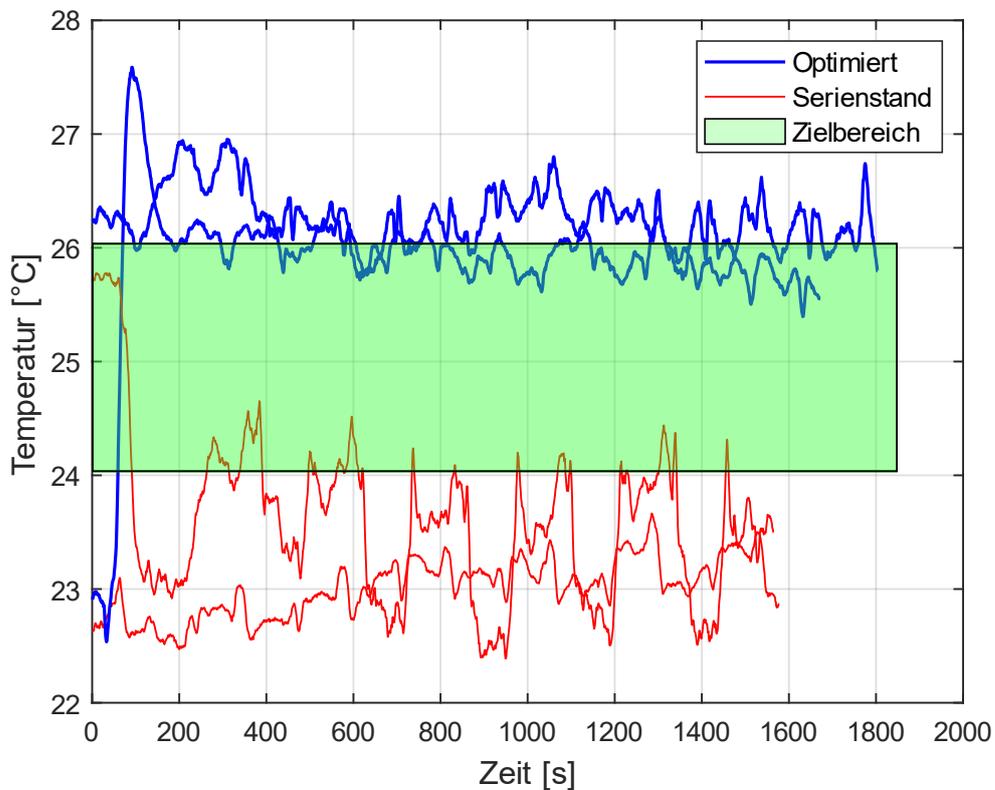


Abbildung 77. Vergleich der gemessenen Lufttemperaturen für Serienapplikation und optimierte Applikation

Die optimierte Applikation erzeugt einen sehr konstanten Temperaturverlauf, der sich durchgängig am oberen Rand des Zielbereichs bzw. bis zu 1 K darüber befindet. Mit der Serienapplikation befindet sich die gemessene Lufttemperatur jedoch am unteren Ende des Zielbereichs bzw. bis zu 2 K darunter. Der Unterschied zwischen den beiden Applikationen ist deutlich sichtbar. Für beide Applikationen sind die Messergebnisse jedoch zufriedenstellend.

5.2.2.2 Fall 2

Für den zweiten Fall wurden zwei Kennlinien optimiert. Dabei konnte der Wert der Zielfunktion von 1,6 auf 0,6 reduziert werden. Die Veränderung der ersten Kennlinie wird in Abbildung 78 gezeigt. Abbildung 79 zeigt die Veränderung der zweiten Kennlinie.

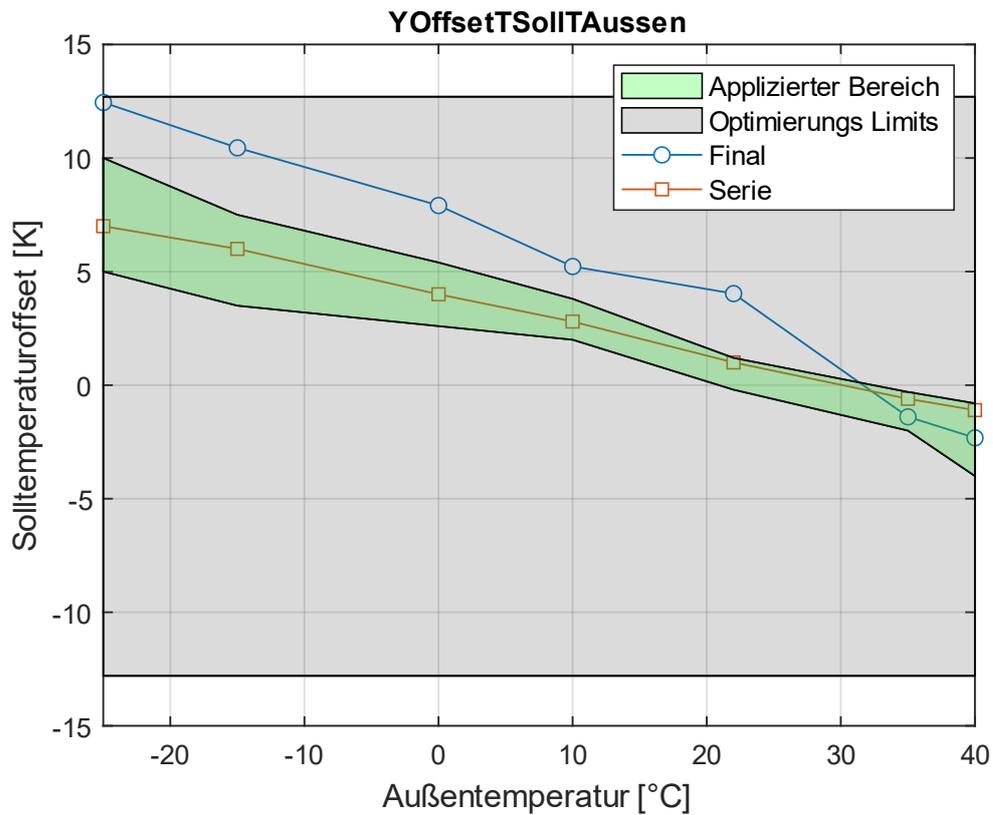


Abbildung 78. Vergleich der Solltemperaturoffsetkennlinie

Der Verlauf der optimierten Kennlinie ist sehr ähnlich zu dem Ergebnis für den ersten Fall. Die Kennlinie verläuft jedoch geringfügig unterhalb der Lösung des ersten Falls, jedoch noch immer deutlich über dem Serienstand. Lediglich im Bereich der hohen Temperaturen ergeben sich größere Unterschiede. In diesem Fall fällt der Abfall der Solltemperaturen weniger stark aus. Auch die zweite Kennlinie, die den Schichtungsoffset bestimmt, verändert sich nur geringfügig durch die Optimierung. Der relevante Stützpunkt bei der neutralen Schichtungseinstellung erhöht sich von 0 K auf etwa 1,5 K. Diese geringfügige Veränderung wirkt der etwas tiefer liegenden ersten Kennlinie entgegen.

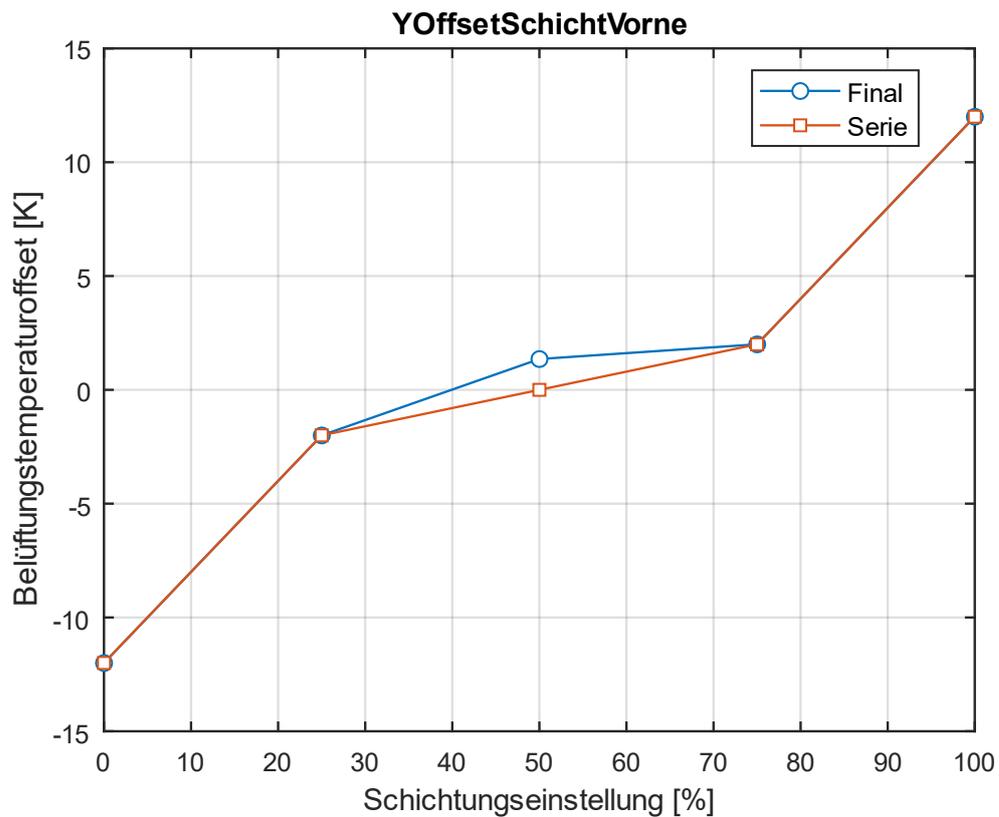


Abbildung 79. Vergleich der Schichtungskennlinie

Aus diesem Grund sind auch die Simulationsergebnisse für die beiden Fälle sehr ähnlich. Das Histogramm über die erreichten Zielwerte bei den einzelnen Betriebspunkten für diesen Fall wird in Abbildung 80 gezeigt. Auch für diesen Fall ist eine sichtliche Verbesserung der Verteilung gegenüber der Serienapplikation zu erkennen. Wie in Fall 1 ist auch hier ein einzelner Ausreißer mit einem Zielwert von etwa 4 zu erkennen.

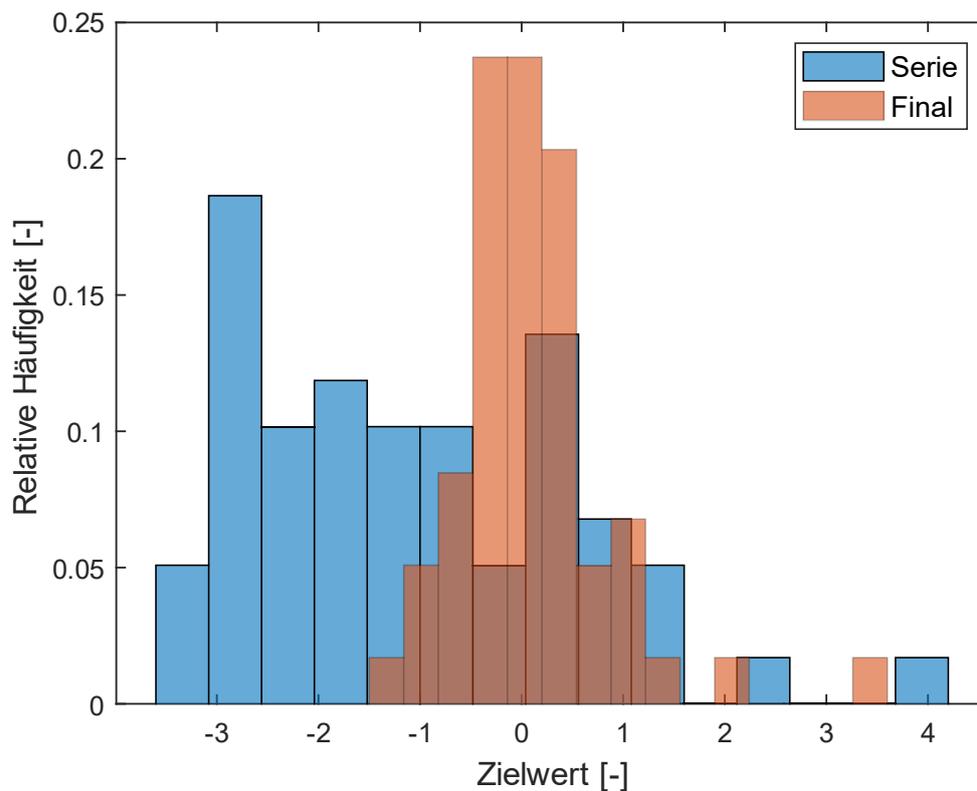


Abbildung 80. Histogramm der erreichten Zielwerte

Die Ergebnisse der Validierungsfahrt werden in Abbildung 81 gezeigt. Auch diese Ergebnisse lassen einen sehr ähnlichen Befund wie im ersten Fall zu. Bei einer der beiden Fahrten mit der optimierten Applikation kam es zu einer konstant leicht erhöhten Innenraumtemperatur. Die Abweichung bewegte sich im Bereich von 1 K bis 2 K. Die Schwankungen zwischen den Fahrten mit der Serienapplikation, sind mit den Schwankungen der Außenbedingungen während des Testtages zu begründen. Weiterhin sind sowohl die Ergebnisse der Serienapplikation als auch die der optimierten Applikation als zufriedenstellend einzuordnen.

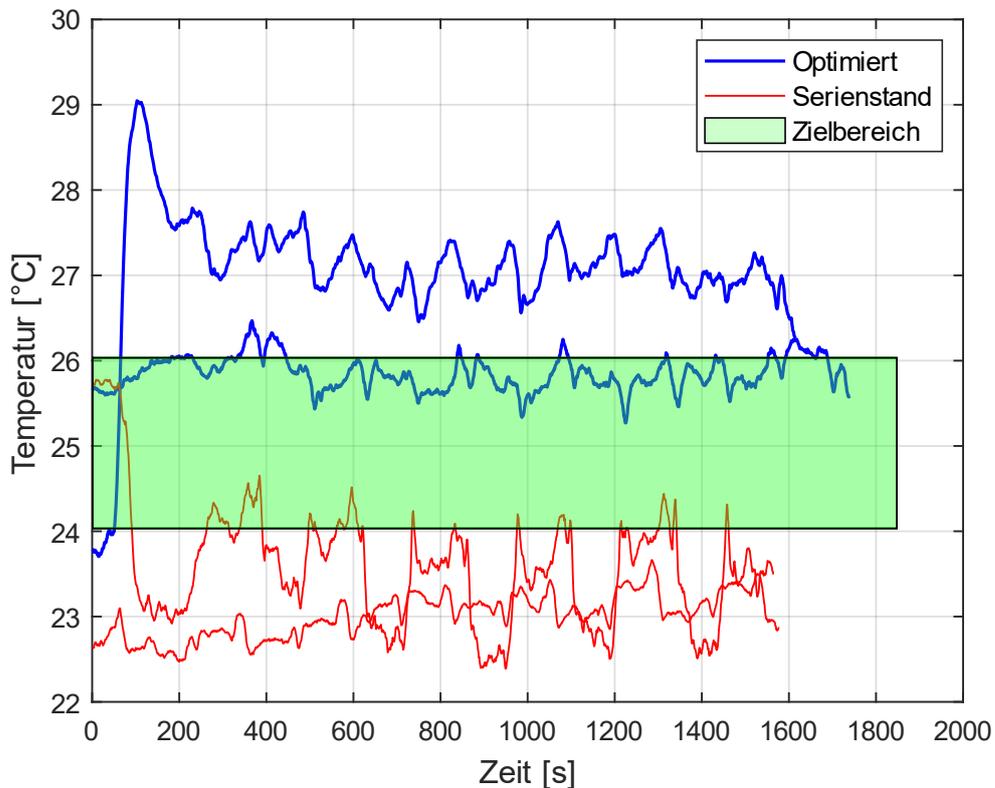


Abbildung 81. Vergleich der gemessenen Innenraumtemperaturen für Serienstand und optimierte Applikation

5.2.2.3 Fall 3

Im dritten Fall wurden erneut zwei Kennlinien und zwei Kennfelder optimiert. Die Kennlinie für den Schichtungsoffset wurde zu einem einzelnen Punkt reduziert, da lediglich eine einzige Einstellung in der Optimierung berücksichtigt wird. Insgesamt ergeben sich 98 Designvariablen, die parallel optimiert werden. Die Ergebnisse für die Kennlinie zum Solltemperaturoffset werden in Abbildung 82 gezeigt. Abbildung 83 zeigt die Veränderung der zweiten Kennlinie und Abbildung 84 und Abbildung 85 vergleichen die Kennfelder vor und nach der Optimierung. Durch die Optimierung konnte der Wert der Zielfunktion von 1,6 auf 0,9 verringert werden.

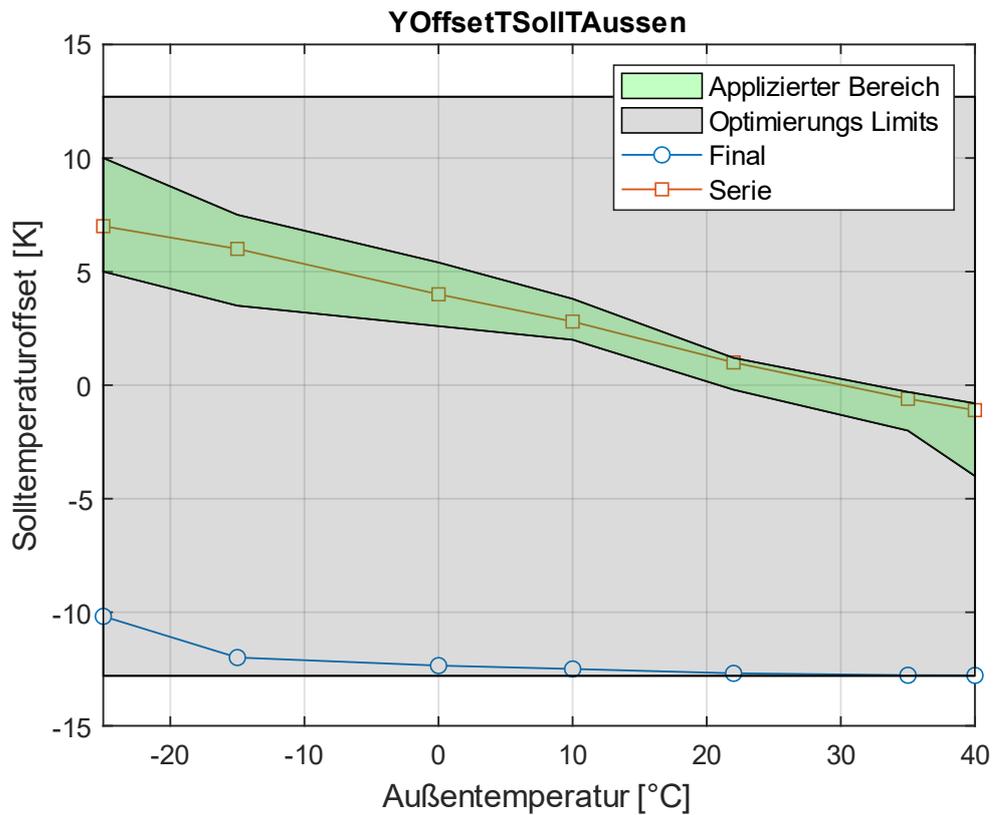


Abbildung 82. Veränderung der Solltemperaturoffset Kennlinie durch die Optimierung

Wie bereits bei der Optimierung mit dem IESS-Modell, wird für diesen Fall eine deutlich andere Kennlinie als im Serienstand erzeugt. Die Kennlinie verläuft über den gesamten Betriebsbereich am unteren Bereich des Optimierungsbereich. Die isolierte Betrachtung dieser Kennlinie deutet auf ein deutlich kühler eingestelltes Fahrzeug hin. Die Solltemperatur wird für alle möglichen Außentemperaturen um mehr als 10 K nach unten korrigiert.

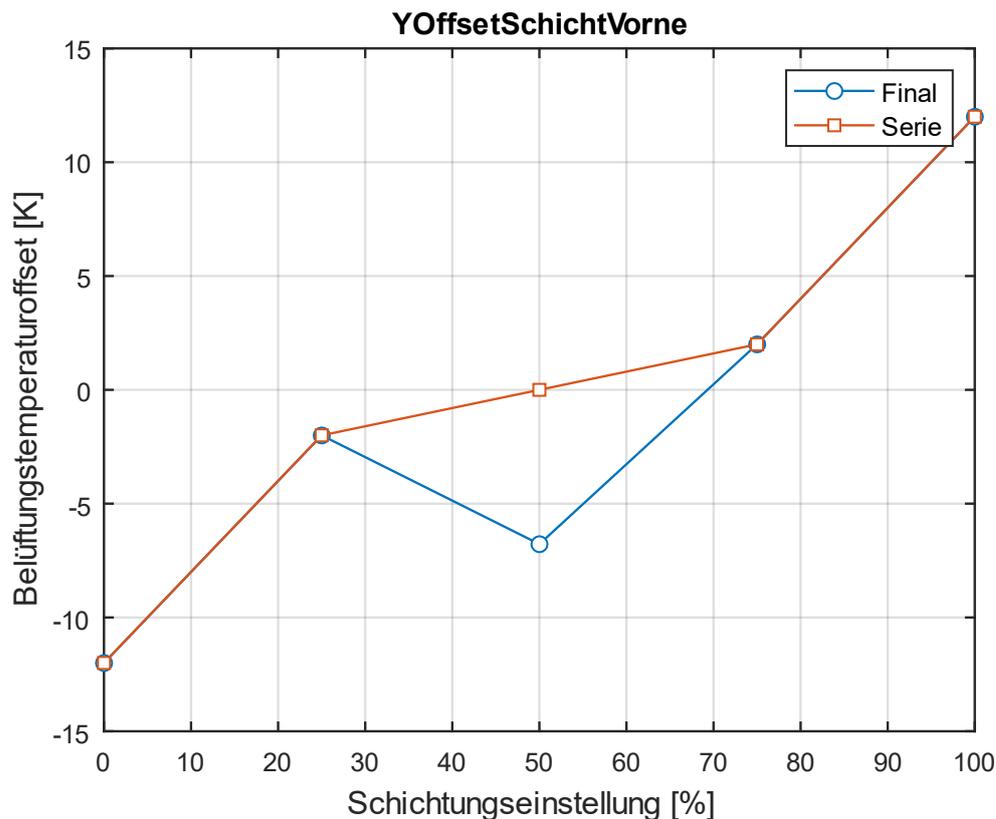


Abbildung 83. Veränderung der Schichtungskennlinie durch den Optimierer

Auch die Kennlinie zur Schichtung wurde optimiert. Durch die Vereinfachung in der Optimierung wurde jedoch nur der Stützpunkt bei einer Schichtungseinstellung von 50 % optimiert. Die übrigen Stützpunkte sind daher für Serienapplikation und optimierte Applikation identisch. Der Stützpunkt für die neutrale Einstellung wurde vom neutralen Wert 0 auf etwa -7 K verändert. Durch diese Anpassung verringert sich die Ausblastemperatur der Belüftungsebene.

Deutliche Veränderungen sind auch bei den beiden optimierten Kennfeldern zu erkennen. Der Serienstand ist jeweils leicht durchsichtig dargestellt und der optimierte Stand ist deckend dargestellt. In beiden Fällen kann beobachtet werden, dass die Steigung in der Richtung der Hauptregelgröße Y deutlich reduziert wurde. Auch in der Richtung der Außentemperatur wurde die Steigung reduziert, jedoch in einem geringeren Ausmaß und von einer kleineren Basis aus. Die optimierten Kennfelder ähneln Ebenen mit relativ konstanten Werten. Zusammen mit der sehr flachen Kennlinie für den Offset der Solltemperatur ergibt sich die Erwartung eines sehr konstanten Regelungsverhaltens. Die Außenbedingungen haben nur einen sehr geringen Einfluss auf das Verhalten der Klimaregelung.

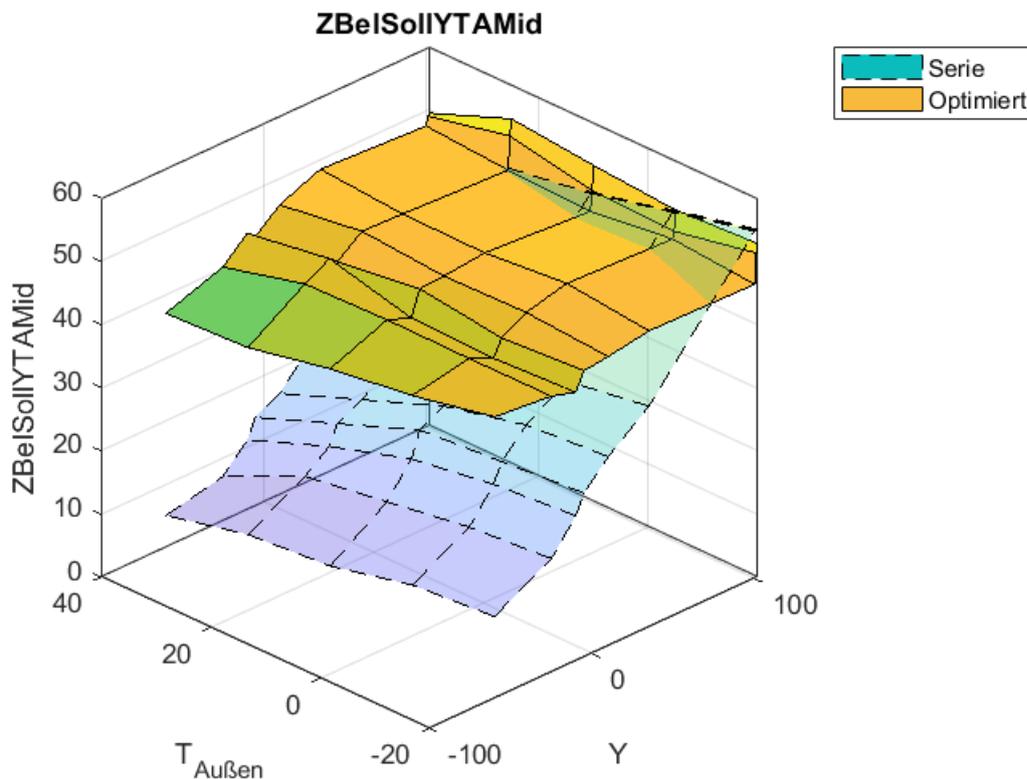


Abbildung 84. Vergleich der Kennfelder für die Belüftungsausblastemperatur Sollwerte

Das Kennfeld für die Ausblastemperatur für die Belüftungsebene befindet sich im Bereich der Maximalwerte der Serienapplikation. Für Y Werte unter 0 ist ein leichtes Abfallen der Solltemperaturen zu erkennen. Von hohen zu niedrigen Außentemperaturen ist ebenfalls ein leichter Trend für fallende Solltemperaturen zu beobachten. Dieser Trend ist dem der Serienapplikation entgegengesetzt und auch physikalisch unlogisch. Niedrige Außentemperaturen sollten prinzipiell durch höhere Ausblastemperaturen kompensiert werden. Durch die Komplexität und teilweise Redundanz der verwendeten Regelung ist diese Aussage jedoch nicht allgemeingültig. An mehreren anderen Stellen in der Regelung wird dieser Effekt ebenfalls berücksichtigt. Es kann daher sinnvoll sein eine Überkompensation an anderen Stellen der Regelungen durch diesen Trend im Kennfeld für die Belüftungssolltemperatur zu kompensieren.

Für Y Werte um 100 ist eine Kante zu erkennen. Dies ist ein Artefakt der Optimierung und wird durch funktionslose Stützpunkte in den Kennfeldern ausgelöst. Dieser Teil des Kennfeldes hat keinen Einfluss auf das Verhalten der Regelung.

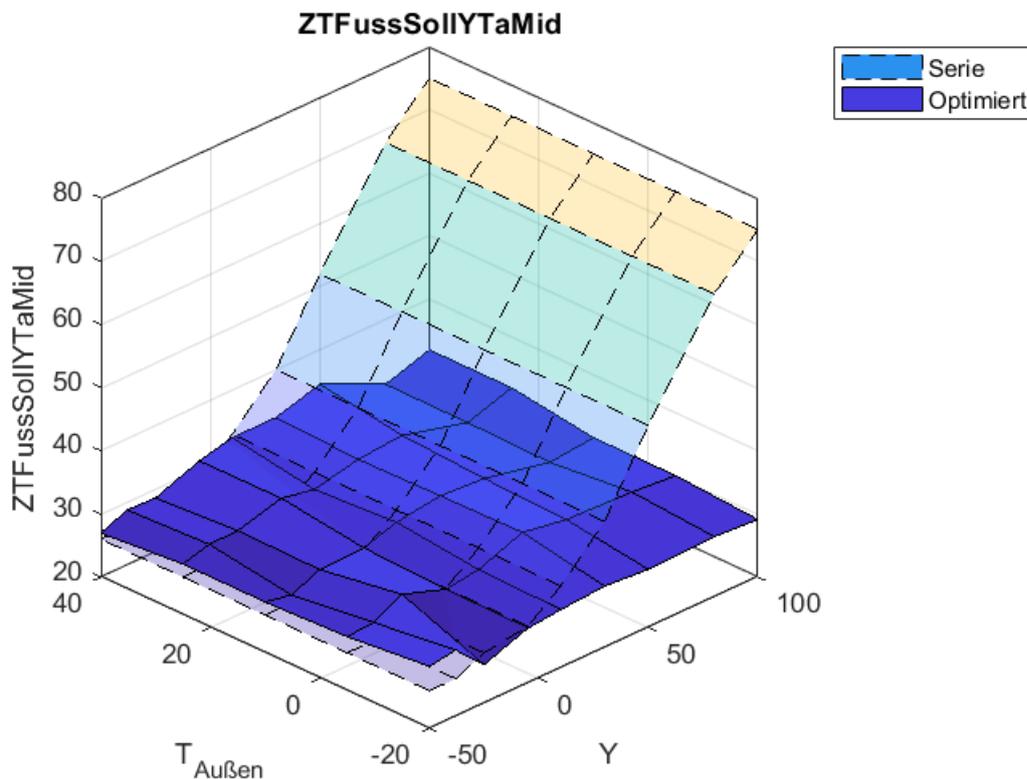


Abbildung 85. Vergleich der Kennfelder für die Fußausblastemperatur Sollwerte

Das Kennfeld der Fußebensolltemperatur ist sehr konstant. In keiner der beiden Dimensionen lässt sich ein klarer Trend erkennen. Das gesamte Kennfeld befindet sich im Bereich der Minimalwerte für die Serienapplikation.

Aus der Betrachtung der optimierten Applikationsparameter lässt sich auf das Verhalten der Regelung schließen. Durch die sehr niedrigen Solltemperaturen wird die Hauptregelgröße Y größtenteils stark negativ sein und versuchen das Fahrzeug zu kühlen. Dies führt zu einer hohen Gebläseleistung, außerdem ist nur ein kleiner Teil der Kennfelder für die Ausblastsolltemperaturen aktiv. Diese Kennfelder signalisieren konstant niedrige Ausblastemperaturen im Fußbereich. Zugleich werden hohe Ausblastemperaturen in der Belüftungsebene mit einer geringen Schwankung in Abhängigkeit vom Y Wert erwartet.

Diese inverse Schichtung mit kühlen Temperaturen im Fußraum und warmen Temperaturen im Kopfraum wird durch den Schichtungsoffset geringfügig reduziert. Jedoch widerspricht das Verhalten der grundlegenden Auslegungsregelung „warme Füße, kalter Kopf“. Außerdem sind diese Temperaturen physikalisch nicht vom Klimagerät darstellbar. Wie die Regelung mit diesen zu erwartenden Abweichungen umgehen wird, ist schwer vorherzusagen.

Ein Histogramm der Zielwerte, die in der Simulation für die 59 Betriebspunkte errechnet wurden, wird in Abbildung 86 gezeigt. Das Histogramm der optimierten Applikation weist einen Mittelwert von etwa 0 und

eine deutlich verringerte Streuung auf. Es sind jedoch auch einige Ausreißer mit Werten bis etwa 4 erkennbar. Insgesamt verspricht dieses Histogramm jedoch deutlich bessere Ergebnisse als die Serienapplikation.

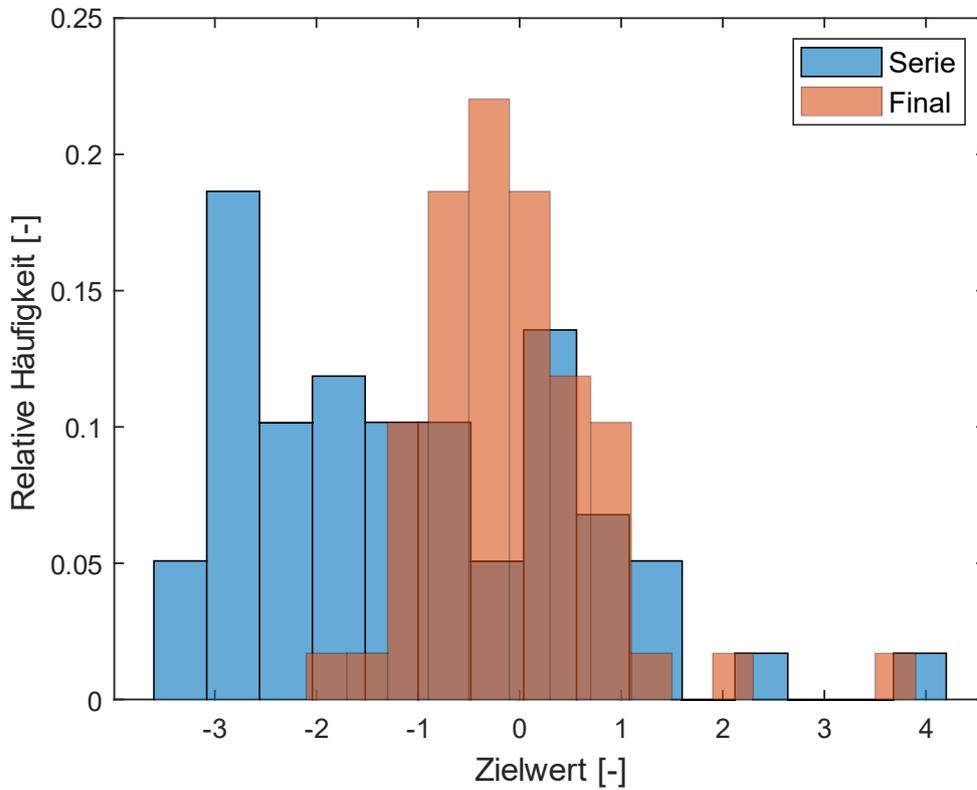


Abbildung 86. Histogramm der erreichten Zielwerte bei den unterschiedlichen Betriebspunkten

Auch diese Applikationen wurden auf der Teststrecke einmalig getestet. Die Ergebnisse dieser Fahrt werden in Abbildung 87 dargestellt. Die Validierungsfahrt fand an einem stark bewölkten Tag mit einer Außentemperatur von etwa 12 °C statt.

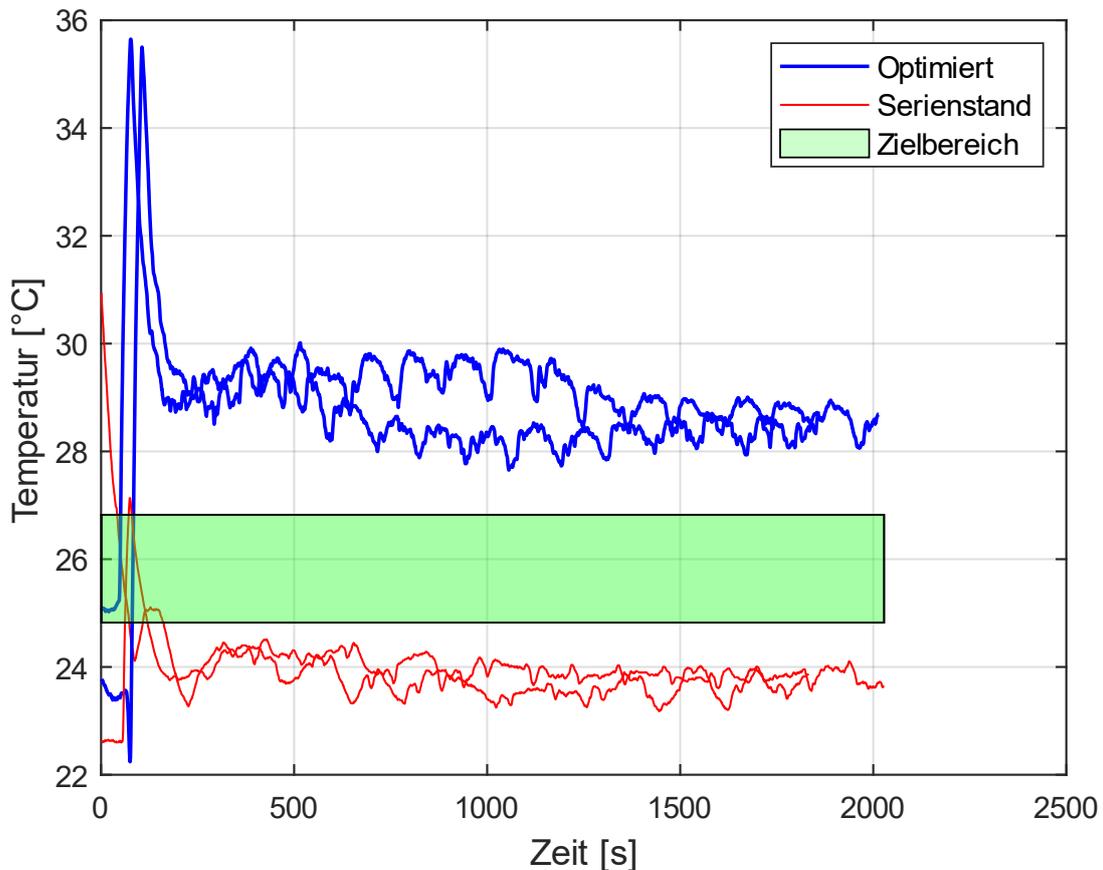


Abbildung 87. Messergebnisse einer Validierungsfahrt für Fall 3 mit dem Taitherm-Modell

Der Zielbereich für diese Außentemperatur liegt etwa im Bereich von 25 °C bis 27 °C. Bei Serienstand wird eine Temperatur von etwa 24 °C erreicht, während die optimierte Applikation einen Gleichgewichtszustand bei etwa 28,5 °C erreicht. Während die Serienapplikation also etwas zu kühl ist, ist die optimierte Applikation etwas zu warm und weicht etwas stärker vom Idealwert ab. Im Hinblick auf die Zielfunktion ist dieses Ergebnis jedoch noch akzeptabel.

Durch die niedrige Solltemperatur wurde bei der optimierten Applikation mit einer sehr hohen Luftmenge geregelt. Dies führte zu einem sehr unangenehmen akustischen Verhalten. Die hohe Luftmenge ist in Abbildung 87 in der Form der sehr starken Ausschläge zu Beginn der Fahrt zu erkennen.

5.2.3 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurden drei unterschiedliche Optimierungsprobleme mit jeweils zwei verschiedenen Modellvarianten gelöst. Insgesamt wurden also sechs Applikationen erzeugt. Alle erzeugten Applikationen unterscheiden sich deutlich vom Serienstand. Die Ergebnisse liegen ebenfalls außerhalb des Varianzbereichs, der sich über verschiedene Fahrzeugmodelle ergibt. Für die Fälle 1 und 2 sind die Änderungen nachvollziehbar und plausibel. Durch die Komplexität von Fall 3 ist eine Plausibilisierung dieses Falles schwierig.

Jede der erzeugten Applikationen wurde im Rahmen von Validierungsfahrten individuell mit dem Serienstand verglichen. Die Ergebnisse der Validierungsfahrten zeigen, dass die Methode prinzipiell funktioniert. Alle sechs untersuchten Fälle erreichten zufriedenstellende Ergebnisse, die größtenteils vergleichbar mit den guten Ergebnissen der Serienapplikation und teilweise sogar besser waren. Wie bereits bei der Modellvalidierung beobachtet wurde, unterscheiden sich die Ergebnisse von IESS-Modell und Taitherm-Modell nur geringfügig. Beide Modellvarianten eignen sich für die Anwendung in der modellbasierten Applikation. Die geringen Unterschiede rechtfertigen den zusätzlichen Aufwand zur Erzeugung des Taitherm-Innenraummoduls nicht. Dies könnte sich jedoch ändern, wenn eine Zielfunktion mit höheren Anforderungen an die lokale Auflösung der Temperaturverteilung verwendet wird. Dies könnte zum Beispiel bei der Verwendung der lokalen Äquivalenttemperaturen der Fall sein und sollte für diesen Fall erneut überprüft werden, sobald geeignete Validierungsmethoden für die entsprechenden physikalischen Größen zur Verfügung stehen. Zudem sollte beachtet werden, dass bei den Validierungsfahrten jeweils nur das Verhalten der Regelung bei einem einzelnen Betriebspunkt überprüft wurde. Durch die sechs Applikationen, die überprüft wurden und vereinzelte Wiederholungen der Versuche, konnte die Aussagekraft der Ergebnisse erhöht werden. Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf extremere Betriebspunkte muss jedoch noch nachgewiesen werden und war kein Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Die Komplexität der Optimierungsergebnisse ist herausfordernd. In keinem der untersuchten Fälle konnte das Konvergenzkriterium erreicht werden. Stattdessen wurden die Optimierungen wegen einer Überschreitung der maximalen Laufzeit abgebrochen. Innerhalb dieses Limits konnten etwa 1000 Iterationen berechnet werden. In Anbetracht der großen Anzahl an Designvariablen ist es wenig verwunderlich, dass mit dieser relativ geringen Anzahl an Iterationen keine Konvergenz erreicht werden konnte. Eine weitere Beschleunigung der Modelllaufzeit sollte sich daher positiv auf die Ergebnisse auswirken. Es konnte ebenfalls beobachtet werden, dass die Konvergenzgeschwindigkeit und damit auch die erreichte Verbesserung mit einer Zunahme der eingeschlossenen Designvariablen abnimmt. Auch dies zeigt die Notwendigkeit einer weiteren Verringerung der Laufzeit, um komplexere Probleme aus der Praxis lösen zu können.

6 Evaluierung der Methode

In diesem Kapitel wird die vorgestellte Methode kritisch hinterfragt. Außerdem wird die präsentierte Arbeit in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet und die Abgrenzung zu früheren Arbeiten herausgearbeitet.

Der Ansatz dieser Arbeit orientiert sich an dem Prozess der modellbasierten Applikation, wie er in der Literatur bereits mehrfach beschrieben wurde. Die bisher beschriebenen Methoden basieren auf der Generierung der Trainingsdaten durch physische Versuche des Gesamtsystems. Mit diesen Daten werden Modelle für statische Betriebspunkte erzeugt. Durch die hohe Trägheit des Klimatisierungssystems sind diese Modelle jedoch nicht für die Applikation der Klimatisierung geeignet. Außerdem sind die benötigten Versuchszeiten und der damit verbundene Aufwand zur Vermessung des Systems durch die Trägheit und die hohe Anzahl an Variablen absolut prohibitiv. Eine geeignete Methode zur Modellierung des Klimatisierungssystems wurde bislang noch nicht präsentiert. Die vorliegende Arbeit füllt diese Lücke und verwendet das erzeugte Modell, um exemplarisch eine modellbasierte Applikation für das Klimatisierungssystem eines Fahrzeugs durchzuführen.

6.1 Bewertung des Modellierungsansatzes

Der entwickelte Modellierungsansatz schließt die Lücke im Wissen und erlaubt eine modellbasierte Applikation der Klimaregelung. Durch die Modellierung des transienten Verhaltens mittels PT-1 Gliedern und der statischen Reaktionen des Systems, sowie der iterativen Berechnung der physikalischen Teilsystemmodelle und des Reglermodells wurde ein geeignetes Gesamtmodell erstellt.

Durch den modularen Aufbau kann das Modell flexibel an andere Klimasystemarchitekturen angepasst werden. Zudem erlaubt dieser Ansatz die intelligente Kombination von physischen und simulativen Experimenten zur Erzeugung der benötigten Trainingsdaten. Durch den modularen Ansatz war es außerdem möglich die Teilsysteme für den Heizkreislauf und den Kältekreislauf aus dem Gesamtmodell herauszulösen. Auf diese Weise konnte der Aufwand zur Erzeugung des Gesamtmodells deutlich reduziert werden, ohne die Genauigkeit in den relevanten Betriebspunkten zu verringern. Die Qualität des Gesamtmodells hängt jedoch in hohem Maße von den verwendeten Black-Box Modellen und damit auch von der Menge und Qualität der verfügbaren Daten ab. In diesem Aspekt unterscheidet sich der Modellierungsansatz nicht von den bisher umgesetzten Modellierungsansätzen für die modellbasierte Applikation.

In dieser Arbeit wurden sowohl experimentelle als auch simulative Methoden zur Erzeugung der Daten untersucht. Beide Verfahren benötigten jedoch substanziellen Aufwand zur Erzeugung der Daten. Die experimentelle Erzeugung der Daten für das Klimagerät stellte sich als herausfordernd heraus. Der Prozess war sehr zeitintensiv und dazu mit Messfehlern behaftet. Außerdem konnten nicht alle Randbedingungen in den Versuchen variiert werden, woraus der Bedarf für Korrekturmodelle erwuchs. Diese Korrekturmodelle stellen eine weitere Fehlerquelle im Gesamtmodell dar. Low fidelity

Simulationsmethoden bieten das Potenzial den Aufwand zur Datenerzeugung deutlich zu reduzieren und so die Menge an verfügbaren Daten zu erhöhen. Dies geht allerdings mit einem Verlust an Genauigkeit einher. Auch dieser Einfluss wurde in Form der IESS-Daten untersucht. Die Ergebnisse zeigen nur einen geringen Unterschied zwischen den beiden verfolgten Ansätzen. Obwohl sich die erzeugten Applikationen voneinander unterscheiden, wurden ähnlich gute Ergebnisse bei den Validierungsfahrten beobachtet. Die Aussagekraft dieser Ergebnisse ist jedoch begrenzt, da die individuellen Modelle nur für wenige Betriebspunkte validiert wurden und deren Qualität daher nicht vollumfänglich beurteilt werden kann.

Obwohl das Ziel des Modells lediglich die Vorhersage stationärer Betriebspunkte ist, können mit dem Modell mit wenigen Ausnahmen auch transiente Fälle simuliert werden. Durch die Integration von zusätzlichen Modulen für den Heiz- und Kältekreislauf in das Gesamtmodell lassen sich diese Lücken schließen. Das resultierende Modell wäre prinzipiell in der Lage das Verhalten des Klimatisierungssystems unter allen erdenklichen Betriebspunkten zu berechnen. Die Genauigkeit der Modelle konnte abgeschätzt werden. Eine Einordnung dieser Einschätzung ist jedoch schwierig, da die Schätzung der Genauigkeit wiederum einer unbekanntenen Ungenauigkeit unterliegt. Außerdem konnten die Modellaussagen zu den auftretenden Massenströmen im Fahrbetrieb nicht validiert werden. Zudem lässt das behelfsmäßig verwendete Maß für den thermischen Komfort keine zuverlässige Übertragung auf die subjektive Wahrnehmung zu.

Einerseits ist die Qualität der Modelle ausreichend, um Validierungsfahrten nachzubilden und generelle Trends zu reproduzieren. Zur Erzeugung von sinnvollen Applikationen ist die Qualität ebenfalls ausreichend. Für die untersuchten Bedingungen konnten die erzeugten Applikationen im Fahrbetrieb teilweise bessere Ergebnisse erzielen als die Applikation, die in den entsprechenden Serienfahrzeugen verwendet wird. Andererseits erschweren zahlreiche kleine Unstetigkeiten in den Modellaussagen den Einsatz effizienterer Optimierungsalgorithmen. Diese Fluktuationen sind allerdings auch teilweise auf das Verhalten der Regelung selbst zurückzuführen. Der Einfluss des Ausgangspunktes auf das Verhalten der Regelung wurde nicht untersucht.

Die Ungenauigkeit wird hauptsächlich durch die Black-Box Modelle für den Innenraum bestimmt. Ungenauigkeiten, die in anderen Teilsystemen auftreten, werden im Innenraummodul teilweise eliminiert und heben sich gegenseitig auf. Fehler im Innenraummodul wirken sich jedoch direkt auf die Zielgröße aus. Dies ist eine Herausforderung, da die Erzeugung zusätzlicher Trainingsdaten für den Innenraum zur weiteren Verbesserung der Innenraummodelle sehr aufwändig ist. Eine weitere Erhöhung der Genauigkeit der Trainingsdaten für das Innenraummodul ist ebenfalls schwierig umsetzbar. Bereits bei den beiden vorgestellten Datenquellen war der Aufwand für die Kalibrierung der Modelle erheblich. Für die Taitherm-Simulationen waren zusätzlich auch die benötigten Rechenkapazitäten beträchtlich.

Die Zeit zur Berechnung des Gesamtmodells für einen Betriebspunkt beträgt auf einem leistungsfähigen modernen Laptop etwa zwei Minuten. Dies ist deutlich länger als bei vergleichbaren Modellen, die in anderen Anwendungen der modellbasierten Applikation eingesetzt werden. Dieser Unterschied ist in dem

Bedarf zur Nachstellung des zeitlichen Verlaufs begründet. Dieses Vorgehen ist wiederum notwendig, um die Pfadabhängigkeit der Regelung berücksichtigen zu können. Die Simulation ist beliebig parallelisierbar. Für Optimierungsaufgaben sind kürzere Laufzeiten dennoch wünschenswert. Glücklicherweise erscheinen durch eine andere technische Implementierung deutliche Geschwindigkeitszuwächse, auch unter Beibehaltung des Modellierungskonzepts, möglich. Dies geschieht jedoch auf Kosten der Flexibilität. Dabei ist anzumerken, dass etwa 90 % der Berechnungszeit auf die Evaluierung der Black-Box Modelle entfällt. Diese bieten also das größte Potenzial zur weiteren Beschleunigung.

Für Anwendungsfälle ohne Berücksichtigung der Regelung bietet das Modell sehr schnelle Antworten. Mehrere Betriebspunkte können pro Sekunde berechnet werden. Mit dieser Geschwindigkeit ergeben sich vollkommen neue Möglichkeiten zur Absicherung, Identifizierung des Designraumes sowie zur Erprobung neuer Hardwarelösungen oder Regelungsstrategien. Die Kapazität für Untersuchungen vervielfacht sich im Vergleich zur derzeitigen analogen Praxis.

6.2 Bewertung des Applikationsansatzes

Von dem verwendeten Modellierungsansatz abgesehen, entspricht der präsentierte Ansatz dem etablierten Stand der Technik, der modellbasierten Applikation. Dabei werden die Applikationsparameter einzeln als Designvariablen verwendet. Dieser Ansatz resultiert für die verwendete Klimaregelung in komplexen Optimierungsproblemen. Bereits für den dritten untersuchten Fall mit zwei Kennlinien und zwei Kennfeldern ergeben sich 98 Designvariablen und daraus etwa 10^{242} mögliche Applikationen. Diese Komplexität limitiert das Potenzial zur Applikation größerer Parametersets. Durch das Einführen zusätzlicher Randbedingungen und das Vorgeben fester Grenzen kann der mögliche Lösungsraum jedoch drastisch eingegrenzt werden. Auch diese Techniken sind bereits Stand der Technik für andere Optimierungsprobleme und können in abgewandelter Form übernommen werden. Neben dieser Möglichkeit existieren Ansätze, um die Anzahl der Designvariablen zu reduzieren. Für die Applikation von Dieselmotoren wurde dies bereits von Neßler [23] untersucht. In der vorliegenden Arbeit wurden solche Ansätze jedoch nicht verfolgt, da lediglich ein Minimalbeispiel betrachtet wurde.

Zur Durchführung der Arbeit wurde eine Applikationsumgebung entwickelt, die die Flexibilität des Ansatzes weiter erhöht. Das Werkzeug hat sich im praktischen Ablauf bewährt und war eine große Erleichterung bei alltäglichen Aufgaben wie der Formulierung von Optimierungsproblemen oder der Verwaltung von Modellen und Ergebnissen. So hat die Applikationsumgebung maßgeblich zur Vermeidung von Fehlern beigetragen und die Durchführung beschleunigt.

Die Validierung der Ergebnisse stellt eine große Herausforderung dar. Dieses Problem konnte nicht vollständig gelöst werden und bietet viel Raum für zusätzliche Forschungsthemen. Zugleich stellt die Validierung oder Bewertung von Klimatisierungssystemen einen weiteren möglichen Anwendungsfall des vorgestellten Modellierungsansatzes dar. Trotz der Einschränkungen im verwendeten Validierungsprozess, lässt sich durch die durchweg guten Ergebnisse und der gesammelten Erfahrung

über das Fahrzeugverhalten ein positives Urteil über die Leistungsfähigkeit der Methode fällen. Das Verhalten des Fahrzeugs unter verschiedenen Reglereinstellungen und Betriebspunkten kann zuverlässig vorhergesagt werden. Außerdem erfüllen die erzeugten Applikationen zuverlässig die Zielfunktion. Die Zielfunktion ist jedoch stark vereinfacht und garantiert nicht immer ein subjektiv zufriedenstellendes Fahrzeugverhalten. Das Formulieren einer hinreichenden Zielfunktion ist sehr herausfordernd. Daher wurde in dieser Arbeit bewusst auf eine stark vereinfachte Zielfunktion zurückgegriffen und die beobachteten Unzulänglichkeiten damit in Kauf genommen. Sobald eine bessere Zielfunktion zur Verfügung steht, kann diese allerdings mühelos in den präsentierten Ansatz eingepflegt werden. Der verfolgte Applikationsansatz ist daher eine vielversprechende Basis für Weiterentwicklungen und kann darüber hinaus für verschiedene einfache Problemstellungen angewandt werden.

6.3 Bewertung der vorliegenden Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Wissenslücke über die Anwendbarkeit der modellbasierten Applikation für das Klimatisierungssystem zu untersuchen. Außerdem sollten die Anforderungen an die Modellqualität und die transienten Eigenschaften der Modelle untersucht werden. Ebenso sollte die Arbeit als Machbarkeitsnachweis für eine modellbasierte Klimaapplikation dienen.

Die Ziele dieser Arbeit wurden erreicht. Es wurde ein neuer Ansatz zur Modellierung des Klimatisierungssystems in einem Fahrzeug präsentiert. Dieser Ansatz eignet sich für einen modellbasierten Applikationsprozess. Die Eignung wurde durch das Applizieren eines begrenzten Parameterumfangs für ein einzelnes Fahrzeug in einem Betriebsbereich bewiesen. Die durchgeführten Validierungsversuche zeigen die hohe Konsistenz der Ergebnisse und werden daher als Machbarkeitsbeweis angesehen.

Das Ziel zur Ableitung von Anforderungen an die verwendeten Modelle konnte jedoch nur teilweise erfüllt werden. Sowohl bei der Bestimmung der Qualität des Modells und der Modellkomponenten als auch bei der Bestimmung der Qualität der Ergebnisse, kommt es durch die verwendeten Validierungsmethoden zu Ungenauigkeiten. Diese Ungenauigkeiten verhindern Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen der Modellgenauigkeit und der Ergebnisqualität eines modellbasierten Applikationsprozesses. Es können jedoch Tendenzen zur Modellgenauigkeit abgelesen werden und eine Gewichtung des Einflusses der einzelnen Module auf die Genauigkeit des Gesamtmodells wurde ebenfalls präsentiert. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die verwendeten Modelle ausreichend genaue Aussagen produzieren, um zufriedenstellende Applikationen zu erzeugen. Zudem werden im Ausblick Vorschläge gegeben, um die erforderlichen Modellanforderungen genauer ableiten zu können.

Eine Verringerung der Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Modell- und Ergebnisqualität ist nach Meinung des Autors nur unter großem Aufwand möglich. Auch wenn sowohl die Qualität der verwendeten Modelle und der Ergebnisse bekannt wäre, ließen sich keine eindeutigen Rückschlüsse auf die Anforderungen an die Modelle ableiten, da auch die verwendete Optimierungsmethodik einen großen

Einfluss auf die Ergebnisse hat. Zur Bestimmung der Modellanforderungen müsste daher zunächst eine Optimierungsmethodik etabliert werden, die konsistent gute Applikationen erzeugt. In Anbetracht der Vielzahl an Voraussetzungen, die erfüllt sein müssen, bevor die genauen Anforderungen an die Modelle für einen modellbasierten Applikationsprozess abgeleitet werden können, konnte dies in der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden. Es konnte jedoch eine Basis mit ausreichender Genauigkeit präsentiert werden. Eine Untersuchung mit künstlich verschlechterten Modellen deutet darauf hin, dass auch weniger genaue Modelle noch zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen können. Das Ziel zur Ableitung von Modellanforderungen konnte trotz des unerwartet großen Einflusses der Optimierungsmethodik erreicht werden. Es wurde zudem die Grundlage gelegt, um in weiterführenden Untersuchungen noch genauere Erkenntnisse zu erlangen.

7 Zusammenfassung

In der Automobilindustrie sind gain scheduling Regelungen weit verbreitet. Auch in der Regelung des Klimatisierungssystems kommt diese Art der Regelung zum Einsatz und erfordert einen hohen Applikationsaufwand, um die allgemeine Regelung auf das jeweilige Fahrzeug einzustellen. Während die Applikation in anderen Regelungsdisziplinen bereits zu großen Teilen durch modellbasierte Verfahren automatisiert ist, basiert die Klimaapplikation noch zu großen Teilen auf manuellen Prozessen. Diese sind sehr aufwändig und haben mehrere Nachteile. Durch die Trends zur Vermeidung von Prototypen, erhöhten Ansprüchen an den Funktionsumfang und die Regelgüte, verkürzten Entwicklungszyklen und der zunehmenden Anzahl an Fahrzeugderivaten und Antriebsvarianten, kommt der aktuelle Prozess an seine Grenzen. Daher wird eine andere Lösung benötigt.

Die modellbasierte Applikation kann eine Lösung dieses Problems darstellen. In anderen Regelungsdisziplinen wurde dieser Prozess bereits erfolgreich erforscht und etabliert. Durch die hohe Trägheit des Klimatisierungssystems im Vergleich zu anderen Systemen im Fahrzeug, können die dort etablierten Methoden der modellbasierten Applikation jedoch nicht übernommen werden. In der vorliegenden Arbeit wurde die Möglichkeit einer modellbasierten Applikation für die Klimaregelung untersucht. Dazu wurde exemplarisch eine modellbasierte Applikation für ein Serienfahrzeug durchgeführt. Um diese Aufgabe zu vereinfachen, wurde ein stark eingegrenzter Funktionsumfang der Regelung betrachtet und die Applikation lediglich für quasistatische Betriebspunkte durchgeführt. Soweit dies möglich und sinnvoll war, wurden bestehende Ansätze übernommen. Wo eine Übernahme nicht möglich war, wurden bestehende Ansätze modifiziert. Die meisten Veränderungen waren im Bereich der Modellierung notwendig. Diese Anpassungen bilden zugleich den Schwerpunkt der vorgestellten Arbeit. Bei den restlichen Aspekten wurde hauptsächlich auf bestehende und vereinfachte Konzepte zurückgegriffen, um das entwickelte Modell in einem minimalen Beispiel bewerten zu können.

Die modellbasierte Applikation besteht aus drei Prozessschritten. Der Objektivierung, der Modellierung und der Optimierung. Die Objektivierung des Klimatisierungszieles ist herausfordernd, da es jeweils aus einem Kompromiss zwischen zahlreichen Aspekten besteht. Allerdings ist bereits die Objektivierung eines der einzelnen Aspekte teilweise sehr komplex. So sind zum Beispiel die Objektivierung der Akustik oder des thermischen Komforts aktive Forschungsfelder. Für eine Untersuchung der Funktionsweise der Methode ist das exakte Ziel jedoch nur von geringer Bedeutung. Es ist wichtig, dass das generische Ziel erreicht werden kann. Wenn dies der Fall ist, kann das Ziel relativ einfach ausgetauscht werden. Daher wurde für diese Arbeit exemplarisch ein einfaches Ziel für den thermischen Komfort gewählt. Dieses Ziel basiert auf den Lufttemperaturen in Kopfhöhe. Für eine sinnvolle Anwendung in der Praxis ist ein geeignetes Ziel jedoch unabdingbar.

Es wurde ein Optimierungsansatz auf der Basis eines evolutionären Algorithmus verwendet. Die einzelnen Kennlinien und Kennfelder wurden jeweils durch ihre Stützstellen abgebildet. Es zeigte sich, dass die Optimierungsmethodik einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse hat.

Der Modellierungsansatz kann nicht aus vorherigen Untersuchungen übernommen werden, da die thermische Trägheit des Klimatisierungssystems deutlich größer ist als bei den bislang untersuchten Systemen. Daher musste ein neuer Ansatz entwickelt werden. Zur Modellierung des Klimatisierungssystems wurde ein modularer Ansatz mit Black-Box Modellen verwendet. In Übereinstimmung mit dem geforderten Anwendungsprofil wurden dabei der Regler, das Klimagerät und der Innenraum als eigenständige Module implementiert. Für jeden Betriebspunkt wurde der zeitliche Verlauf iterativ von einem definierten Startpunkt bis zu einem Beharrungszustand berechnet. Um von den statischen Aussagen der Black-Box Modelle zu einem transienten Verlauf zu kommen, wurden PT-1 Glieder eingesetzt.

Das Reglermodul wurde von der Funktionslogik des Fahrzeugreglers abgeleitet und für die Anwendung in der Simulation angepasst. Dies beinhaltete zahlreiche Vereinfachungen, da für das untersuchte Beispiel lediglich bestimmte Betriebspunkte berücksichtigt wurden. Durch diese Vereinfachungen konnten einige Funktionen entfernt werden und bestimmte Signale mit konstanten Werten belegt werden, statt diese Werte zu berechnen.

Die Datengrundlage für das Klimagerätmodul wurde mittels eines Fahrzeugversuchs ermittelt. Bei diesem Versuch wurde mit einem selbst entwickelten Messsystem die Ausblastemperatur und der Massenstrom an jedem einzelnen Ausströmer gemessen. In dem Versuch wurden jeweils konstante Aktuatoreinstellungen angefahren und gewartet, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Dieser wurde daraufhin gemessen und für das Training der Modelle verwendet. Insgesamt wurden 650 Betriebspunkte vermessen. Zur Approximation des zeitlichen Verlaufs wurden ebenfalls PT-1 Glieder verwendet.

Zur Datengenerierung für das Innenraummodul waren Fahrzeugversuche durch die hohe Trägheit des Innenraums nicht geeignet. Daher wurde auf Computersimulationen zurückgegriffen. Mittels zwei verschiedener Simulationswerkzeuge wurden zwei unabhängige Datenbasen generiert und damit zwei Versionen der Black-Box Modelle trainiert. Dabei wurden 2200 bzw. 1000 Betriebspunkte simuliert. Als Simulationsprogramme wurden dabei die Indoor Environmental Simulation Suite des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik und eine Kombination der kommerziellen Simulationstools Star CCM+ und Taitherm verwendet.

Die einzelnen Module wurden anschließend zu einem Gesamtmodell zusammengeführt. In Validierungsversuchen konnten mit diesem Modell die Lufttemperaturen in Kopfhöhe für Fahrten unter wechselnden Bedingungen zuverlässig reproduziert werden. Der 95% Konfidenzintervall für den Vorhersagefehler betrug 2,6 K bzw. 3,8 K.

Mit diesem Gesamtmodell wurde anschließend die Applikation durchgeführt. Dazu wurden drei unterschiedliche Parametersätze ausgewählt und jeweils über einen Satz von 59 Betriebspunkten optimiert. Die Parametersätze unterschieden sich dabei in ihrem Umfang. Anschließend wurden die Ergebnisse dieser modellbasierten Applikation in Fahrversuchen validiert. Für alle untersuchten Fälle konnten dabei zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Die Zielfunktion wurde im Versuch teilweise besser erfüllt als dies mit der Serienapplikation der Fall war. Durch den Umfang der Validierungsversuche war jeweils nur ein kleiner Teil der applizierten Parameter aktiv. Zukünftige Versuche sollten darauf abzielen ein breiteres Spektrum an Außenbedingungen zu validieren.

Somit stellt die vorgestellte Arbeit einen Machbarkeitsnachweis für eine modellbasierte Applikation der Klimaregelung im Fahrzeug dar. Außerdem wurde ein geeigneter Modellierungsansatz erarbeitet. Die vorgestellte Methode bietet zudem die Möglichkeit ein vertieftes Systemverständnis über das Klimatisierungssystem zu erwerben. Außerdem bildet die Applikationsumgebung die Grundlage für eine große Anzahl von weiteren Entwicklungsmöglichkeiten.

8 **Ausblick**

In dieser Arbeit wurde ein Modellierungsansatz für das Klimatisierungssystem eines Fahrzeuges präsentiert und die Eignung des erzeugten Modells für einen modellbasierten Applikationsprozess demonstriert. Dieser Ansatz bietet vielfältige Möglichkeiten der Weiterentwicklung. Das präsentierte Modell und die Applikationsumgebung bieten eine gute Ausgangsbasis für diese Untersuchungen und Weiterentwicklungen.

In diesem Kapitel werden weiterführende Entwicklungen und Untersuchungen vorgestellt. Zum besseren Verständnis des präsentierten Ansatzes werden zunächst mögliche Modifikationen zur Verbesserung der Untersuchungen aufgezeigt. Danach werden mögliche Erweiterungen und mögliche Anwendungsfälle für die vorgestellte Methodik präsentiert. Schlussendlich wird ein Ausblick auf eine mögliche Überführung der Erkenntnisse in den Serienentwicklungsprozess eines Automobilherstellers gegeben. Die dazu notwendigen Modifikationen werden ebenfalls aufgezeigt.

8.1 **Verbesserungen/Untersuchungen**

Die Hauptkriterien zur Bewertung einer Modellierungsmethode sind die Genauigkeit der Ergebnisse, die benötigte Laufzeit und der Aufwand zur Erzeugung der Modelle. Da nun eine Basis etabliert ist, können weiterführende Ansätze zur Verbesserung der einzelnen Kriterien einfacher umgesetzt werden.

Eine Einschätzung der benötigten Genauigkeit für die einzelnen Module, um ein vorgegebenes Ziel zu erreichen, ist essenziell, um eine effiziente Ausgestaltung des Modellerstellungsprozesses sicherzustellen. Diese Anforderungen konnten in dieser Arbeit nur teilweise abgeleitet werden. Es sollten daher weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden. Dazu werden verbesserte Verfahren zur Bestimmung der Qualität der Modelle und der Applikationsergebnisse benötigt. Dies könnte durch festgelegte Fahrzyklen im klimatisierten Windkanal erreicht werden. Außerdem muss eine Optimierungsmethode mit geringen Schwankungen in der Ergebnisqualität etabliert werden. Sobald diese Voraussetzungen erfüllt sind, sollten Modelle verschiedener Qualität erzeugt werden und die Qualität der damit erzeugten Applikationen untersucht werden. Diese Untersuchungen können wertvolle Erkenntnisse zur benötigten Genauigkeit und damit auch zum erforderlichen Aufwand bei der Erzeugung der Trainingsdaten liefern. Außerdem ergibt sich ein vertieftes Verständnis über die Zusammenhänge der einzelnen Komponenten innerhalb eines Klimatisierungssystems.

Die verwendeten Versuchspläne wurden jeweils erzeugt, um eine möglichst gleichmäßige Abdeckung des gesamten möglichen Betriebsbereiches zu gewährleisten. Dieses Ziel wurde erreicht. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass durch diese Versuchspläne viele Informationen über irrelevante Betriebspunkte gesammelt wurden. Daraus resultiert ein hoher Aufwand zur Erzeugung der Trainingsdaten und eine suboptimale Qualität der trainierten Modelle für den relevanten Bereich. Das Einbeziehen der Systemeigenschaften in die Erstellung optimierter Versuchspläne verspricht eine Verbesserung der

Modellgenauigkeit bei gleichzeitiger Reduktion des Testaufwandes. In Kombination mit dahingehend befähigten Simulationstools oder Prüfständen kann ebenfalls die Verwendung adaptiver Versuchspläne untersucht werden. Dabei wird der Versuchsplan abhängig von den bislang erzeugten Testdaten kontinuierlich angepasst und für die bislang gemessenen Charakteristiken des Systems optimiert.

Die verwendete Regelung des Klimasystems enthält mehrere Hystereseffekte. Um die Konvergenzgeschwindigkeit der Simulationen zu erhöhen, wurden die Simulationen jedoch immer mit einem annähernd eingeschwungenen Startpunkt initialisiert. Durch die verschiedenen Hystereseffekte hat der Startpunkt einer Simulation möglicherweise einen Einfluss auf den erreichten Beharrungszustand. Dieser Effekt wurde in der vorliegenden Arbeit nur stark verkürzt untersucht und sollte in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden.

Der Zeitbedarf zur Simulation des Modells ist kurz. Durch die große Anzahl der benötigten Iterationen zur Lösung der Optimierungsprobleme ergibt sich trotzdem ein erheblicher Zeitbedarf. Eine weitere Verkürzung der Ausführungszeit sollte daher angestrebt werden. Zahlreiche Ansätze zur weiteren Beschleunigung der Berechnungen wurden identifiziert und sollten näher betrachtet werden. Die Implementierung der Modelle in Matlab/Simulink fällt zunächst auf. Eine direktere Implementierung in C Code oder Ähnlichem sollte die Ausführungszeit deutlich verkürzen. Daneben sollte die Möglichkeit einer Berechnung mit adaptiven Zeitschritten untersucht werden. Auch diese Möglichkeit verspricht eine weitere Beschleunigung der Simulationen.

Ein Großteil der benötigten Simulationszeit resultiert aus der Notwendigkeit zum iterativen Durchschreiten der Zeit bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Die Anwendung anderer numerischer Lösungsverfahren verspricht die Anzahl der benötigten Iterationen drastisch zu reduzieren. Es ist jedoch unklar, wie das Verhalten der Regelung mit einem solchen Verfahren abgebildet werden kann. Die Möglichkeiten alternativer Lösungsverfahren sollten daher weiter untersucht werden.

Innerhalb einer einzelnen Iteration macht die Evaluierung der Black-Box Modelle etwa 90 % der benötigten Zeit aus. Die schnellere Evaluierung der Black-Box Modelle hat daher großen Einfluss auf die Berechnungszeit des Gesamtmodells. Außerdem hat die Qualität der Black-Box Modelle, insbesondere im Innenraummodul einen großen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse des Gesamtmodells. In der vorliegenden Arbeit wurden bereits einige Typen an Black-Box Modellen und verschiedene Methoden der richtigen Modellauswahl untersucht. In Kombination mit verbesserten Trainingsdaten sollten jedoch noch weitere Möglichkeiten zur weiteren Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit und Verringerung der Berechnungszeit untersucht werden.

Die Validierung der Applikationsergebnisse bewegt sich im Spannungsfeld zwischen dem benötigten Aufwand und der Aussagekraft der Ergebnisse. Auch hier bietet die Möglichkeit von detaillierten Simulationen Potenzial, um bessere Ergebnisse mit weniger Aufwand zu erzeugen. Diese Möglichkeit sollte untersucht werden. Außerdem sollte die in dieser Arbeit angewandte Validierungsmethode erweitert

werden, um eine Allgemeingültigkeit der gefundenen Ergebnisse zu gewährleisten. Dies wäre zum Beispiel durch mehrere Validierungsfahrten unter wechselnden und kontrollierten Außenbedingungen möglich. Diese verbesserte Validierungsmethode würde es außerdem erlauben genauere Aussagen über die Anforderungen an die einzelnen Modelle zu treffen. Dazu könnten einzelne Modelle mit bekannten Fehlern modifiziert werden und jeweils die Auswirkungen auf die Gesamtergebnisse untersucht werden.

8.2 Erweiterungen und Adaptionen

Neben den Untersuchungen zu möglichen Verbesserungen der Methode ist es ebenfalls möglich die Methode weiterzuentwickeln und so neue Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen. Insbesondere der Modellierungsansatz kann durch kleine Abwandlungen in zahlreichen anderen Anwendungen eingesetzt werden.

8.2.1 Zusätzliche Teilsysteme

In Zukunft wird in der Automobilindustrie eine zunehmende Elektrifizierung der Antriebsstränge erwartet. Das vorgestellte Modell war jedoch auf die Anwendung bei einem nicht elektrifizierten Fahrzeug zugeschnitten. Die Einflüsse der elektrischen Komponenten werden nicht abgebildet. Es ist daher momentan nicht möglich den Einfluss einer Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf die Applikation abzubilden. Um dies zu ermöglichen müssen zusätzliche Module für den Kältekreislauf und den Heizkreislauf in das Gesamtmodell aufgenommen werden. Die Erzeugung und Integration dieser Module sollten in weiterführenden Projekten erforscht werden.

Das Fehlen dieser Module ist momentan der verhindernde Faktor zur Simulation und damit auch zur Applikation transienter Betriebspunkte. Mit dem Einbringen geeigneter Module in das Gesamtmodell wird daher die Simulation instationärer Aufheiz- oder Abkühlvorgänge möglich. Damit ergibt sich die Möglichkeit auch die Applikation dieser Vorgänge durchzuführen. Es sind jedoch weitergehende Untersuchungen notwendig, um den Optimierungsvorgang für diese Aufgaben zu befähigen. Dies ist der Fall, da neben den Modellen sowohl die Auswahl der zu untersuchenden Betriebspunkte als auch die Zielfunktion angepasst werden müssen, um sinnvolle Ergebnisse zu erzielen.

8.2.2 Multikriterielle Optimierung

In der vorgestellten Methodik wurde lediglich der erreichte thermische Komfort im Fahrzeug als Zielfunktion verwendet. Bei der Bewertung einer Applikation spielen jedoch noch zahlreiche weitere Kriterien eine Rolle. Es erscheint daher sinnvoll das Optimierungsproblem in ein multikriterielles Problem zu überführen. Dabei werden weitere Kriterien wie die Akustik oder der Energieverbrauch in der Zielfunktion berücksichtigt. Außerdem erscheint es sehr sinnvoll eine geeignete Metrik zur Bewertung des thermischen Komforts zu etablieren. Die verwendete Metrik auf Basis der Lufttemperaturen in Kopfhöhe eignet sich nicht für verlässliche Aussagen.

Der modulare Aufbau des Gesamtmodells erlaubt das Einbringen zusätzlicher Module zur Berechnung dieser Teilziele. Zur Erzeugung der Module kann wiederum auf den vorgestellten Prozess zurückgegriffen werden. Dazu müssen zunächst geeignete Einzelkriterien ausgewählt werden und diese anschließend methodisch gegeneinander abgewogen werden. Die erfolgreiche Umsetzung einer multikriteriellen Optimierung erscheint extrem vorteilhaft. Die akustisch stark auffälligen Applikationsergebnisse für den dritten Fall verdeutlichen die Notwendigkeit dieser Weiterentwicklung für praktische Anwendungen der Methode.

8.2.3 Hardwareentwicklung

Das Modell kann ebenfalls zur Bewertung von Hardwareabweichungen angewandt werden. Abbildung 88 zeigt den Prozess, der dazu verwendet werden kann. Als Ausgangspunkt liegt eine Applikation vor, die bewertet wird. Obwohl die Applikation bereits abgeschlossen ist, werden Hardwareänderungen erforderlich. Die Auswirkungen auf die Modelle, zum Beispiel veränderte Ausblastemperaturen bei bestimmten Betriebspunkten, müssen bekannt sein. Im nächsten Schritt werden die Änderungen zum Beispiel über Korrekturmodelle in den Modellen berücksichtigt. Mithilfe der angepassten Modelle wird eine Neuapplikation durchgeführt und die Applikation bewertet. Die Bewertungen der beiden Applikationen werden abschließend miteinander verglichen. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, inwiefern es möglich ist die Änderungen im Hardwareverhalten durch die Applikation zu kompensieren.

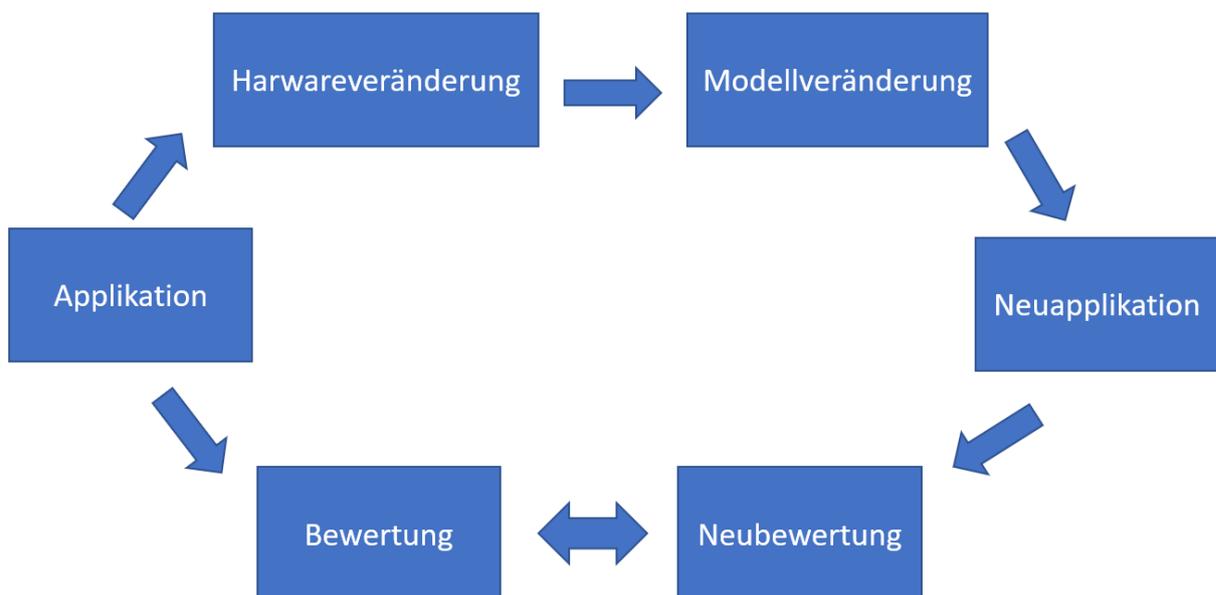


Abbildung 88. Ablauf zur Bewertung von Hardwareabweichungen

Wenn man diesen Prozess umdreht, wird es möglich exakte Anforderungen für das Idealverhalten der Hardwarekomponenten abzuleiten. Zum Beispiel indem im Vorhinein über die Nutzungsdaten Aussagen zur Häufigkeit von bestimmten Betriebspunkten getroffen werden können. Anhand dieser Informationen können anschließend in einem iterativen Prozess Anforderungen an die Hardware abgeleitet werden. Abbildung 89 zeigt wie so ein Prozess aussehen könnte.

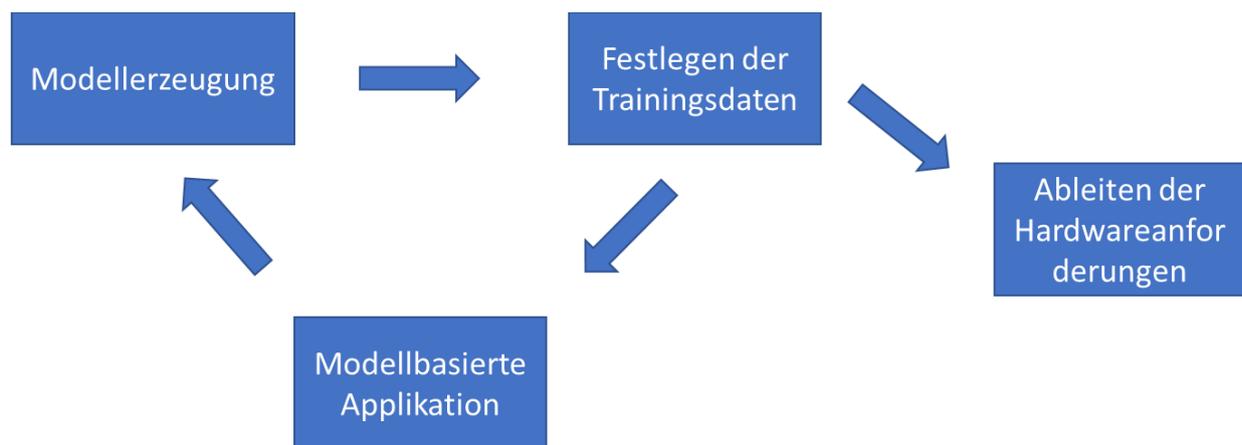


Abbildung 89. Ablauf zur Generierung von Hardwareanforderungen

Bei diesem Prozess werden die zu entwickelnden Komponenten durch Black-Box Modelle abgebildet. Die Datenbasis der Black-Box Modelle wird jedoch im Vorhinein ausgewählt und stellt zugleich den Anforderungskatalog für die Hardwareentwicklung dar. Die Auswahl der Betriebspunkte orientiert sich dabei an den in früheren Iterationen abgeleiteten Nutzungsdaten. Für ein Set an Trainingsdatenpunkten wird jeweils eine Applikation erzeugt und die Leistung des resultierenden Fahrzeugs bewertet. In einem nächsten Schritt werden die Trainingspunkte bzw. das Wunschverhalten der Hardware angepasst und erneut eine Applikation erzeugt und bewertet. Auf diese Weise kann die Hardware unter Berücksichtigung der Möglichkeiten der Regelung für den gewünschten Anwendungsfall optimiert werden. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass die zu entwickelnde Hardware auch den Anforderungen entsprechen kann und daher die Black-Box Modelle das Verhalten der Hardware gut repräsentieren.

8.2.4 Regelungsentwicklung

Die entwickelte Simulationsplattform kann ebenfalls zur Bewertung und Entwicklung neuer Regelungskonzepte verwendet werden. Dabei kann insbesondere der Effekt zusätzlicher oder veränderter Sensoren auf das System beurteilt werden.

Die gegenwärtig genutzte Regelung wurde iterativ über einen langen Zeitraum weiterentwickelt. Im Laufe der Zeit haben sich durch das Zufügen neuer Funktionen zahlreiche Redundanzen innerhalb der Regelung ergeben. Es bestehen daher zahlreiche Möglichkeiten die Funktionslogik der Regelung zu vereinfachen. Diese Vereinfachungen würden jedoch eine Neuapplikation ohne funktionierenden Startpunkt erfordern. Diese Neuapplikation würde einen großen Aufwand ohne direkte Vorteile in der Performance bedeuten und wurde daher bislang nicht durchgeführt. Die vorgestellte Methode könnte diesen Aufwand deutlich reduzieren und auch direkt von einer vereinfachten Funktionslogik profitieren.

Neben dieser Möglichkeit zur Unterstützung der Weiterentwicklung der bestehenden Regelung bietet das erarbeitete Modell die Grundlage für die mögliche Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung. Diese Regelung benötigt keine Applikationsparameter. Sie kann anhand von Modellen und vorgegebenen Zielen

in jeder Situation selbstständig entscheiden, wie dieses Ziel am besten erreicht werden kann und die entsprechenden Handlungen durchführen.

Durch eine große Redundanz der verschiedenen Applikationsparameter ist die Optimierung der Applikationsparameter deutlich komplexer als die direkte Optimierung der Aktuatorposition für eine festgelegte Umgebung. Daher erscheint diese Art der Regelung vorteilhaft. Statt ein komplexes Optimierungsproblem einmalig zu lösen und daraus Regeln für das richtige Verhalten abzuleiten, wird kontinuierlich ein leichteres Optimierungsproblem gelöst. Dieser Ansatz der Regelung benötigt keine vorherige Applikation und auch die Funktionsentwicklung wird deutlich vereinfacht. Lediglich das Verhalten der Zielfunktion muss festgelegt werden.

8.2.5 Forschung zur thermischen Behaglichkeit

Ein weiteres Anwendungsfeld liegt im Bereich der Forschung zum thermischen Empfinden. Im Rahmen der weiteren Vernetzung von Fahrzeugen werden stets mehr Daten über die Nutzung von Fahrzeugen verfügbar. Der vorgestellte Modellierungsansatz ermöglicht es über die Information der Einstellungen und der gemessenen oder abgeleiteten Umgebungsbedingungen auf die thermischen Bedingungen im Fahrzeug zu schließen. Zudem sind Informationen über die Veränderungen in den Kundeneinstellungen verfügbar. Unter der Annahme, eines Zusammenhanges zwischen einer Veränderung der Einstellung und der thermischen Behaglichkeit des Kunden vor der Einstellungsänderung, ergeben sich vielfältige Untersuchungsmöglichkeiten. Dabei könnte auf deutlich mehr Probanden zurückgegriffen werden, als es bislang in Studien zur thermischen Behaglichkeit möglich ist.

8.3 Entwicklung zur Serienanwendung

Die präsentierten Untersuchungen waren maßgeblich durch ein Problem in der industriellen Anwendung motiviert. Daher drängt sich die Frage nach der Überführung in den Stand der Technik auf. Der vorgestellte Modellierungs- und Applikationsansatz ist prinzipiell auch auf einen Serienentwicklungsprozess anpassbar. Es existiert jedoch eine Anzahl an Problemen, die im Serieneinsatz erhöhten Aufwand erfordern. Außerdem ist in der derzeitigen Form der industrielle Nutzen unklar, da nur einige Teile der Applikation erzeugt werden können.

Der modellbasierte Ansatz entfaltet seinen größten Nutzen, wenn er ganzheitlich auf den gesamten Applikationsumfang angewandt wird. Bei Limitierungen des Umfangs verschlechtert sich das Aufwands-Nutzen Verhältnis, da der Aufwand zur Erzeugung der Modelle ähnlich hoch bleibt, der mögliche Nutzen jedoch schrumpft.

Eine ganzheitliche Umsetzung erzeugt jedoch einen starken Bruch der gesamten bislang eingesetzten Methodik. Große Unternehmensorganisationen, wie es Automobilproduzenten üblicherweise sind, sind eher auf das inkrementelle Verbessern und Verändern von Prozessen ausgelegt und haben oftmals

Schwächen im Hinblick auf disruptive Veränderungen. Aus der operativen Perspektive wäre daher eine schrittweise Einführung wünschenswert.

8.3.1 Aufteilung der Modelle

Um eine schrittweise Einführung zu ermöglichen, müssen die manuelle und die modellbasierte Applikation kombiniert werden. Die Interaktion zwischen manuellen und modellbasierten Teilen wirft dabei weitere Fragen auf. Um einen solchen Ansatz zu ermöglichen, muss die Applikation streng in verschiedene Module aufgeteilt werden.

Bei den einzelnen Modulen muss exakt festgelegt werden, welche objektiven Ziele die Applikation für dieses Modul jeweils erreichen muss. Auf diese Weise können in der modellbasierten Applikation auch Teilsysteme, die noch nicht manuell appliziert wurden, berücksichtigt werden.

8.3.2 Datenquellen

Der Aufwand zur Generierung der Trainingsdaten für die zahlreichen Black-Box Modelle war beträchtlich und stellte einen großen Teil der insgesamt benötigten Zeit dar. Für eine vorteilhafte Überführung in den Serienentwicklungsprozess muss dieser Aufwand reduziert werden. Neben optimierten Versuchsplänen bieten sich Simulationen zur Datengenerierung an.

Die Simulation bietet die Möglichkeit den Prozess der Datengenerierung deutlich zu beschleunigen und weiter zu automatisieren. Dazu müssen jedoch geeignete Simulationstools für das Klimagerät, den Innenraum und gegebenenfalls weitere Teilsysteme entwickelt werden. Eine Parametrisierung dieser Modelle bietet die Möglichkeit den Aufwand zur Datengenerierung weiter zu verringern und den gesamten Prozess weitestgehend zu automatisieren.

Für einige Teilsysteme bietet sich auch die Möglichkeit dedizierter Prüfstände zur Erfassung der Trainingsdaten an. Diese bieten ebenfalls die Möglichkeit effiziente Prozesse zur Erzeugung der Trainingsdaten zu etablieren. Für die verschiedenen Teilsysteme muss jeweils im Einzelfall untersucht werden, welche Option die größten Vorteile mit sich bringt.

Neben diesen Aspekten wäre die Übertragbarkeit der trainierten Modelle auf andere Fahrzeuge oder Fahrzeugvarianten sehr vorteilhaft. Durch die Verwendung des modularen Modellierungsansatzes und von Baukastenkomponenten in den Fahrzeugen, ist dies bereits teilweise möglich. Insbesondere im Bereich des Innenraummoduls ist dies jedoch nicht möglich. Durch die Einführung von Korrekturmodellen für Karosserieparameter oder gewisse Sonderausstattungen, lässt sich die benötigte Anzahl an Innenraumsimulationen eventuell deutlich vermindern. Diese Möglichkeit sollte für den Einsatz in der Praxis ebenfalls untersucht werden. Die Formulierung geeigneter Korrekturmodelle erscheint durch die nichtlinearen thermischen und strömungsmechanischen Vorgänge im Fahrzeuginnenraum jedoch sehr herausfordernd.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Pereirinha, P.G., González, M., Carrilero, I., Anseán, D. et al., “Main Trends and Challenges in Road Transportation Electrification,” *Transportation Research Procedia* 33:235–242, 2018, doi:[10.1016/j.trpro.2018.10.096](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.096).
- [2] Tschöke, H., Mollenhauer, K., and Maier, R. (eds.), “Handbuch Dieselmotoren,” Springer Reference Technik, 4th ed., Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-07696-2, 2018.
- [3] Großmann, H., “Pkw-Klimatisierung: Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung,” VDI-Buch, Springer, Berlin u.a., ISBN 978-3-642-05494-5, 2010.
- [4] Schlenz, D. (ed.), “PKW-Klimatisierung IV,” Expert Verlag, ISBN 3-8169-2554-5, 2006.
- [5] Hofhaus, J. (ed.), “PKW-Klimatisierung V,” Expert Verlag, ISBN 978-3-8169-2766-2, 2007.
- [6] Ackermann, J., Brinkkötter, C., and Priesel, M., “Neue Ansätze zur energieeffizienten Klimatisierung von Elektrofahrzeugen,” *ATZ Automobiltech Z* 115(6):480–485, 2013, doi:[10.1007/s35148-013-0136-x](https://doi.org/10.1007/s35148-013-0136-x).
- [7] Schmidt, C. and van Treeck, C., “Local Climate-control Measures in Electric Vehicles,” *ATZ Worldw* 117(11):56–63, 2015, doi:[10.1007/s38311-015-0072-3](https://doi.org/10.1007/s38311-015-0072-3).
- [8] Stuke, P.E.B., “Vertical interior cooling system for passenger cars: Trials and evaluation of feasibility, thermal comfort and energy efficiency,” Dissertation, Technische Universität München, München, 2016.
- [9] Wang, M., Wolfe, E., Ghosh, D., Bozeman, J. et al., “Localized Cooling for Human Comfort,” *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 7(2):755–768, 2014, doi:[10.4271/2014-01-0686](https://doi.org/10.4271/2014-01-0686).
- [10] Warthmann, A., Wölki, D., Metzmacher, H., and van Treeck, C., “Personal Climatization Systems—A Review on Existing and Upcoming Concepts,” *Applied Sciences* 9(1):35, 2019, doi:[10.3390/app9010035](https://doi.org/10.3390/app9010035).
- [11] Hoffmann, G., “Kältemittel für die mobile Klimatisierung,” *ATZ Automobiltech Z* 119(1):16–21, 2017, doi:[10.1007/s35148-016-0159-1](https://doi.org/10.1007/s35148-016-0159-1).
- [12] Böckh, P. von and Stripf, M., “Technische Thermodynamik,” Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [13] Strasser, K., Braun, M., Reng, M., Mönkediek, T. et al., “Der Kältekreislauf des Audi A5,” in: Hofhaus, J. (ed.), *PKW-Klimatisierung V*, Expert Verlag, ISBN 978-3-8169-2766-2, 2007.
- [14] Afram, A., Janabi-Sharifi, F., Fung, A.S., and Raahemifar, K., “Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems: A state of the art review and case study of a residential HVAC system,” *Energy and Buildings* 141:96–113, 2017, doi:[10.1016/j.enbuild.2017.02.012](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.012).
- [15] Nassif, N., Kaji, S., and Sabourin, R., “Optimization of HVAC control system strategy using two-objective genetic algorithm,” *HVAC&R Research* 11(3), 2005.
- [16] Huang, Y., Khajepour, A., Bagheri, F., and Bahrami, M., “Modelling and optimal energy-saving control of automotive air-conditioning and refrigeration systems,” *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 231(3):291–309, 2017, doi:[10.1177/0954407016636978](https://doi.org/10.1177/0954407016636978).
- [17] Ng, B.C., Darus, I.Z.M., Jamaluddin, H., and Kamar, H.M., “Application of adaptive neural predictive control for an automotive air conditioning system,” *Applied Thermal Engineering* 73(1):1244–1254, 2014, doi:[10.1016/j.applthermaleng.2014.08.044](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.044).
- [18] Metzmacher, H., Wölki, D., Schmidt, C., Frisch, J. et al., “Energy-Efficient Climate Control in Electric Vehicles Through Innovative Sensor Technology and Novel Methods for Thermal Comfort Evaluation,” 87:65–75, 2017, doi:[10.1007/978-3-319-47196-9_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-47196-9_6).
- [19] Metzmacher, H., Wölki, D., Schmidt, C., and van Treeck, C., “Personalized Air-Conditioning in Electric Vehicles Using Sensor Fusion and Model Predictive Control,” 158:119–129, 2019, doi:[10.1007/978-3-030-00819-2_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00819-2_9).
- [20] Kopp, C. and Schaller, J., “Applikation von Dieselmotoren,” in: Tschöke, H., Mollenhauer, K., and Maier, R. (eds.), *Handbuch Dieselmotoren*, Springer Reference Technik, 4th ed., Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-07696-2:419–437, 2018.
- [21] Merker, G.P., Schwarz, C., and Teichmann, R., “Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse,”
- [22] Atkinson, C. and Mott, G., “Dynamic Model-Based Calibration Optimization: An Introduction and Application to Diesel Engines,” doi:[10.4271/2005-01-0026](https://doi.org/10.4271/2005-01-0026).
- [23] Neßler, A., “Optimierungsstrategien in der modellbasierten Dieselmotorenentwicklung,” Dissertation, TU Berlin, Berlin, 2015.
- [24] Castagné, M., Bentolila, Y., Chaudoye, F., Hallé, A. et al., “Comparison of Engine Calibration Methods Based on Design of Experiments (DoE),” *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP* 63(4):563–582, 2008, doi:[10.2516/ogst:2008029](https://doi.org/10.2516/ogst:2008029).
- [25] Tietze, N., “Model-based Calibration of Engine Control Units Using Gaussian Process Regression,”
- [26] Hoppe, M., “Model-based development and calibration of diagnosis functions in the cooling circuit of a vehicle,” 2017, doi:[10.18154/RWTH-2017-06644](https://doi.org/10.18154/RWTH-2017-06644).
- [27] Kahlbau, S., “Mehrkriterielle Optimierung des Schaltablaufs von Automatikgetrieben,” Dissertation, Brandenburgische Technische Universität, Cottbus, 2013.
- [28] Nippold, C., Küçükay, F., and Henze, R., “Analysis and application of steering systems on a steering test bench,” *Automot. Engine Technol.* 1(1-4):3–13, 2016, doi:[10.1007/s41104-016-0006-0](https://doi.org/10.1007/s41104-016-0006-0).
- [29] Fritz, M., “Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung von Nutzfahrzeugen,” Zugl.: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Diss., 2015, Karlsruher Schriftenreihe
Fahrzeugsystemtechnik / Institut für Fahrzeugsystemtechnik, vol. 37, KIT Scientific Publ, Karlsruhe, Baden, ISBN 978-3-7315-0384-2, 2015.
- [30] Domschke, R. and Matthes, M., “In-the-Loop Simulation of Electronic Automatic Temperature Control Systems: HVAC Modeling,” in: Schlenz, D. (ed.), *PKW-Klimatisierung IV*, Expert Verlag, ISBN 3-8169-2554-5, 2006.
- [31] Fanger, P.O., “Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering,” Danish Technical Pr, Copenhagen, ISBN 87-571-0341-0, 1970.
- [32] DIN, “Ergonomie der thermischen Umgebung-Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen-Teil2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur,” DIN EN ISO 14505-2:2006.

- [33] DIN, "Ergonomie der thermischen Umgebung-Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit," DIN EN ISO 7730:2005.
- [34] Nilsson, H.O., "Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models," *Arbete och hälsa vetenskaplig skriftserie*, NR 2004:2, National Institute for Working Life, Stockholm, ISBN 91-7045-703-4, 2004.
- [35] Stolwijk, J.A.J., "Dynamic mathematical model of physiological regulation of body temperature in human beings," *NASA Technical report*, 1971.
- [36] Fiala, D., "Dynamic simulation of human heat transfer and thermal comfort," Dissertation, De Montfort University, Leicester, 1998.
- [37] Cheng, Y., Niu, J., and Gao, N., "Thermal comfort models: A review and numerical investigation," *Building and Environment* 47:13–22, 2012, doi:[10.1016/j.buildenv.2011.05.011](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.011).
- [38] Fitch, F.B., "Warren S. McCulloch and Walter Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of mathematical biophysics, vol. 5 (1943), pp. 115–133," *J. symb. log.* 9(2):49–50, 1944, doi:[10.2307/2268029](https://doi.org/10.2307/2268029).
- [39] Teich, I., "Meilensteine der Entwicklung Künstlicher Intelligenz," *Informatik Spektrum* 43(4):276–284, 2020, doi:[10.1007/s00287-020-01280-5](https://doi.org/10.1007/s00287-020-01280-5).
- [40] Chilès, J.-P. and Desassis, N., "Fifty Years of Kriging," 36:589–612, doi:[10.1007/978-3-319-78999-6_29](https://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6_29).
- [41] Rasmussen, C.E. and Williams, C.K.I., "Gaussian Processes for Machine Learning," MIT Press, ISBN ISBN 026218253X, 2006.
- [42] Dahan, H., Cohen, S., Rokach, L., and Maimon, O., "Proactive Data Mining with Decision Trees," Springer New York, New York, NY, 2014.
- [43] Zhang, C. and Ma, Y., "Ensemble Machine Learning," Springer US, Boston, MA, 2012.
- [44] Richter, S., "Statistisches und maschinelles Lernen," Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [45] Lee, J.A. and Verleysen, M., "Nonlinear Dimensionality Reduction," Springer New York, New York, NY, 2007.
- [46] Cunningham, P., "Dimension Reduction," 2007.
- [47] Garud, S.S., Karimi, I.A., and Kraft, M., "Design of computer experiments: A review," *Computers & Chemical Engineering* 106:71–95, 2017, doi:[10.1016/j.compchemeng.2017.05.010](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.010).
- [48] Sobol, I.M., "Distribution of points in a cube and approximate evaluation of integrals," *U.S.S.R Comput Maths.* 7:86–112, 1967.
- [49] Halton, J.H., "Algorithm 247: Radical-inverse quasi-random point sequence," *Commun. ACM* 7(12):701–702, 1964, doi:[10.1145/355588.365104](https://doi.org/10.1145/355588.365104).
- [50] Siebertz, K., van Bebber, D., and Hochkirchen, T., "Versuchspläne für komplexe Zusammenhänge," 189–230, doi:[10.1007/978-3-662-55743-3_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55743-3_8).
- [51] Wolpert, D.H. and Macready, W.G., "No free lunch theorems for optimization," *IEEE Trans. Evol. Computat.* 1(1):67–82, 1997, doi:[10.1109/4235.585893](https://doi.org/10.1109/4235.585893).

- [52] Stein, O., "Grundzüge der Nichtlinearen Optimierung," Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-662-55593-4, 2018.
- [53] Kacprzyk, J. and Schaefer, R., "Foundations of Global Genetic Optimization," vol. 74, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [54] Jarre, F. and Stoer, J., "Optimierung," Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [55] Trujillo, L., Schütze, O., Maldonado, Y., and Valle, P., "Numerical and Evolutionary Optimization – NEO 2017," vol. 785, Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-319-96104-0, 2019.
- [56] Reynoso Meza, G., Blasco Ferragud, X., Sanchis Saez, J., and Herrero Durá, J.M., "Controller Tuning with Evolutionary Multiobjective Optimization," vol. 85, Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [57] Eberhart, R. and Kennedy, J., "A new optimizer using particle swarm theory," :39–43, doi:[10.1109/MHS.1995.494215](https://doi.org/10.1109/MHS.1995.494215).
- [58] Finnila, A.B., Gomez, M.A., Sebenik, C., Stenson, C. et al., "Quantum annealing: A new method for minimizing multidimensional functions," *Chemical Physics Letters* 219(5-6):343–348, 1994, doi:[10.1016/0009-2614\(94\)00117-0](https://doi.org/10.1016/0009-2614(94)00117-0).
- [59] Dorigo, M., Birattari, M., and Stutzle, T., "Ant colony optimization," *IEEE Comput. Intell. Mag.* 1(4):28–39, 2006, doi:[10.1109/MCI.2006.329691](https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691).
- [60] Dueck, G., "New Optimization Heuristics," *Journal of Computational Physics* 104(1):86–92, 1993, doi:[10.1006/jcph.1993.1010](https://doi.org/10.1006/jcph.1993.1010).
- [61] Dutta, D. and Mahanty, B. (eds.), "Numerical Optimization in Engineering and Sciences," vol. 979, Springer Singapore, Singapore, 2020.
- [62] Jahn, P., Lassahn, G., and Qiu, K., "Model-Based Calibration of an Automotive Climate Control System," *SAE WCX Proceedings*.
- [63] Yang, W., Wang, K., and Zuo, W., "Neighborhood Component Feature Selection for High-Dimensional Data," *JCP* 7(1), 2012, doi:[10.4304/jcp.7.1.161-168](https://doi.org/10.4304/jcp.7.1.161-168).
- [64] Robnik-Šikonja, M. and Kononenko, I. *Machine Learning* 53(1/2):23–69, 2003, doi:[10.1023/A:1025667309714](https://doi.org/10.1023/A:1025667309714).
- [65] Rosipal, R. and Krämer, N., "Overview and Recent Advances in Partial Least Squares," 3940:34–51, doi:[10.1007/11752790_2](https://doi.org/10.1007/11752790_2).
- [66] ISO, "Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation," 21748.
- [67] Pathak, A., Norrefeldt, V., Lemouedda, A., and Grün, G., "The Modelica Thermal Model Generation Tool for Automated Creation of a Coupled Airflow, Radiation Model and Wall Model in Modelica," :115–124, doi:[10.3384/ecp14096115](https://doi.org/10.3384/ecp14096115).
- [68] Norrefeldt, V. and Grün, G., "VEPZO - Velocity Propagating Zonal Model for the prediction of airflow pattern and temperature distribution in enclosed spaces," :279–286, doi:[10.3384/ecp12076279](https://doi.org/10.3384/ecp12076279).
- [69] Strupp, N.C. and Lemke, N., "Klimatische Daten und Pkw-Nutzung : Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa, USA, China und Indien," *FAT-Schriftenreihe*.

