

2 Stand der Technik

Die Methodik zur Vorhersage von Bauteiltemperaturkollektiven mit Hilfe numerischer Simulation baut auf früheren Ergebnissen in den im Folgenden dargestellten Themengebieten auf. Zunächst wird ein Überblick über den Stand der Forschung im Bereich der Elastomeralterung gegeben, um die Motivation für die Ermittlung von Kollektiven herauszuarbeiten. Für die Berechnung von Bauteiltemperaturen existiert in der Daimler AG ein Standardsimulationsprozess im Bereich Thermische Absicherung, dessen Entwicklung und aktueller Status hier dargestellt wird. Es wird zusätzlich auf verfügbare Quellen für Kollektivdaten und damit auf die Basis für eine Validierung der vorzustellenden Vorhersagemethode eingegangen. Zuletzt wird gezeigt, was Bauteiltemperaturkollektive von Kollektiven in anderen Fachgebieten unterscheidet und welche bisherigen Ansätze für die Vorhersage von Bauteiltemperaturkollektiven vorgestellt worden sind.

2.1 Vorhersage der Elastomeralterung

Im Vergleich zu anderen Bauteilgruppen zeigen Elastomerbauteile teils signifikante thermische Alterungserscheinungen ohne eine Überschreitung von thermischen Grenzwerten [28, 59]. Alterung ist dabei definiert als die irreversible Veränderung von Materialeigenschaften des Bauteils über seine Lebensdauer [18]. Die reversible Veränderung dieser Eigenschaften, z. B. durch eine kurzfristige Temperaturänderung während der Fahrt, wie sie in der Fahrdynamik untersucht wird, fällt nicht unter diesen Begriff.



Abbildung 2.1: Thermisch bis zur Zerstörung gealterte Elastomerbauteile [15]

Im Fahrzeug tritt vor allem thermisch-oxidative Alterung auf [61]. Das bedeutet, dass das Bauteil aufgrund einer erhöhten Aktivierungsenergie unter Einfluss des Luftsauerstoffs altert. Dadurch verändern sich die mechanischen Werkstoffeigenschaften, wie Dehnfähigkeit oder Zugfestigkeit [22, 31, 51]. Dies kann auch sichtbare Schäden nach sich ziehen, wie sie in Abbildung 2.1 zu sehen sind.

Thermische Alterung ist ein größtenteils chemischer Prozess, dessen Geschwindigkeit von der Temperatur abhängig ist. Zur Berechnung der Alterung kann für Elastomere in einem eingeschränkten Rahmen die Arrhenius-Gleichung (Gl. 2.1) verwendet werden.

$$k = A \cdot e^{\frac{E_A}{RT}} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Dabei ist k die Reaktionsrate der Hauptalterungsreaktion, A der Frequenzfaktor des Aufeinandertreffens von zwei Reaktionspartnern, E_A die Aktivierungsenergie der Reaktion, R die allgemeine Gaskonstante und T die Absoluttemperatur. Je höher also die Temperatur des Bauteils ist, desto schneller läuft die Alterungsreaktion ab. Diese Gleichung gilt allerdings nur für einen einzelnen dominanten Reaktionsprozess [11, 17]. Für technisch relevante Prozesse werden Erweiterungen benötigt, wobei die einfachsten eine kumulierte Schadensanreicherung annehmen [22].

Stand der Forschung in diesem Bereich ist die Vorhersage von thermisch-oxidativer Alterung an Prüfkörpern unter Laborbedingungen. Dazu werden von mehreren Arbeitsgruppen Testmethoden entwickelt und vor allem das chemische Verständnis der Alterung vorangetrieben. Weiterführende Information finden sich u. a. bei [39, 40, 49, 58, 67, 70]. Eine ausführliche Zusammenfassung der Forschungsarbeit zur Elastomeralterung findet sich bei Celina [12]. Schmid et al. [61] zeigen ein Beispiel für die industrielle Anwendung der aktuellen Forschungsergebnisse.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Arbeiten und die weitere Forschung im Bereich der Werkstoffwissenschaften verbessern die systematische Vorhersagefähigkeit der Elastomeralterung. Um weitere Fortschritte in diesem Bereich und die Übertragung auf Entwicklungsprozesse zu unterstützen, sind Temperaturinformationen über die reale Lebensdauer der betrachteten Bauteile notwendig. Dies ist die Schnittstelle zwischen der thermischen Absicherung und der Auslegung der Elastomerbauteile. Deshalb liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Bereitstellung von Temperaturkollektiven. Sie stellen die Randbedingungen für alle Vorhersagemethoden dar und sind somit essentiell für eine technische Anwendung der Elastomeralterungsvorhersage.

2.2 Simulationsmethodik der thermischen Absicherung

Im Bereich der thermischen Absicherung ist heute eine vollständig dreidimensionale Simulation der Luftströmung und des Wärmetransports in und zwischen Bauteilen Stand der Technik. Ein Überblick über die grundlegenden numerischen Methoden, die dazu genutzt werden, findet sich in [63], [13] oder in größerem Detail bei [7] und [41]. Im Folgenden wird die Entwicklung der Funktionsumfänge dargestellt.

Die ersten Schritte in der numerischen dreidimensionalen Simulation von Motorraumströmungen und Temperaturverteilungen unternahmen unter anderen Reister, Bauer und Ehrenreich Mitte der 1990er Jahre [4, 52]. Bis zum Ende dieses Jahrzehnts ist die Methode weiter verfeinert und erweitert worden. Einen Flaschenhals in der Beschleunigung der Simulation stellt vor allem die

Vernetzung der Modelle dar [53]. Seit Anfang der 2000er Jahre ist die Simulation in der thermischen Absicherung fähig, alle Wärmetransportmechanismen abzubilden. Über gekoppelte Fluid- und Strukturberechnungen lassen sich grobe Gesamtfahrzeugmodelle oder feinere Detailmodelle, z. B. eines Motorlagers, untersuchen [5]. Lange steht die Netzgenerierung im Fokus der Methodenverbesserung [68], die Erweiterung des Simulationsumfangs wird jedoch ebenfalls vorangetrieben.

In 2000 publizieren Damodaran und Kaushik [16] eines der ersten Gesamtfahrzeugsimulationsmodelle, das alle Wärmetransportmechanismen abbildet. Die Wärmeleitung ist hier jedoch auf die Oberfläche der Bauteile beschränkt. Zusätzlich führen sie eine Temperaturabhängigkeit der Dichte in ihr Modell ein. Für die weitere Entwicklung entscheidend ist die Nutzung eines unstrukturierten, automatisch generierten Netzes, das zu einer deutlichen Beschleunigung des Preprocessings führt.

Die oben beschriebene Vorarbeit führt in 2003/04 zu einer Methode für die Simulation eines Gesamtfahrzeugmodells, deren Prozess in [55] und deren Ergebnisse in [43] vorgestellt werden. Die Wärmetransportmechanismen werden mit separaten Programmen berechnet und über die Kosimulationsplattform MpCCI gekoppelt. Eine weitere Möglichkeit der Kopplung stellen Fortunato et al. 2005 vor [29]. Hier werden Fortran- und Matlabalgorithmen genutzt, um eine Außenströmung mit der Motorraumströmung zu verbinden und das Postprocessing zu beschleunigen.

2007 wird von Kaushik [42] gezeigt, dass auch instationäre Gesamtfahrzeugsimulationen mit einer Kombination von Programmen möglich sind. Unter Berücksichtigung zeitabhängiger Randbedingungen stellt er eine Simulation über mehrere Stunden vor, die mehrere nach einander durchgeführte Testzyklen nachbildet.

Die Basis für die derzeitigen Simulationsmethoden stellen zwei gekoppelte Gesamtfahrzeugmodelle dar. Im einen werden Außen- und Motorraumdurchströmung und im anderen Wärmeleitung und -strahlung berechnet. Lüfter und Räder werden mit Hilfe der Multiple-Reference-Frame-Methode (MRF) auch in stationären Lastfällen als drehend simuliert sowie Wärmeübertrager als

poröse Medien mit homogenen Wärmeeinträgen modelliert. Der Stand der Technik der aktuell verwendeten Methoden wird hier beschrieben.

Auf Basis von existierenden Gesamtfahrzeugmodellen entwickelt Weidmann 2008 [78] eine auf MpCCI basierende Kopplungsmethode, die die instationäre Berechnung des Nachheizens ermöglicht.

Die nächsten Schritte erweitern vor allem die simulierten Prozesse. An anderer Stelle verfeinert Schütz [62] z. B. die Methoden zur Kühlungsauslegung von Bremsen und vergrößert damit den Umfang der simulativ überprüfbaren Bauteile. Pulz [50] löst den Motor und sein Kühlsystem detailliert auf und ermöglicht so die integrierte Simulation von Parametern, die zuvor aus Prüfstandsmessungen übernommen worden sind.

Um die Kühlkreisläufe jedoch effizient und auch unter instationären Bedingungen simulieren zu können, wird deren Modellierung in der 1D-Simulation vorangetrieben. Weinrich, Stapf et al. [69, 79] zeigen wie eine kombinierte Motorlastwechsel- und hydrodynamische Kühlkreislauftsimulation die nötigen Randbedingungen für die weitere 3D-Simulation der thermischen Absicherung liefern können.

Enriquez-Geppert [27] untersucht eine vollständig dreidimensional modellierte Durchströmung der Abgasanlage inklusive der darin enthaltenen Abgasreinigungskomponenten. Einen anderen Ansatz für den Abgastrakt wählt die Arbeitsgruppe um Frank und Christel [33, 34, 75]. Sie verwenden zur Ermittlung von Wärmeübergangskoeffizienten auf der äußeren Abgasanlagenoberfläche ein auf das Fahrzeug kalibriertes 1D-Modell.

In der neuesten Erweiterung des Funktionsumfang zeigt Disch in [20] wie eine instationäre kundenmäßige Bergfahrt berechnet werden kann. Dazu verbindet er eine instationäre Struktursimulation mit in regelmäßigen Abständen ausgeführten stationären Strömungssimulationen, siehe Abbildung 2.2. Die dabei entwickelte Methode zur Verbindung von Fluid- und Struktursimulation wird auch in dieser Arbeit verwendet.

Die heute genutzten Methoden sind alle auf die Berechnung von maximalen Temperaturen ausgelegt. Eine zeitliche Temperaturverteilung wird für instationäre Betrachtungen berechnet, dient allerdings nur der Nachbildung eines

instationären physikalischen Vorgangs und nicht der Ermittlung einer Häufigkeitsverteilung von Temperaturen. Bisher können keine Bauteiltemperaturkollektive simuliert werden.

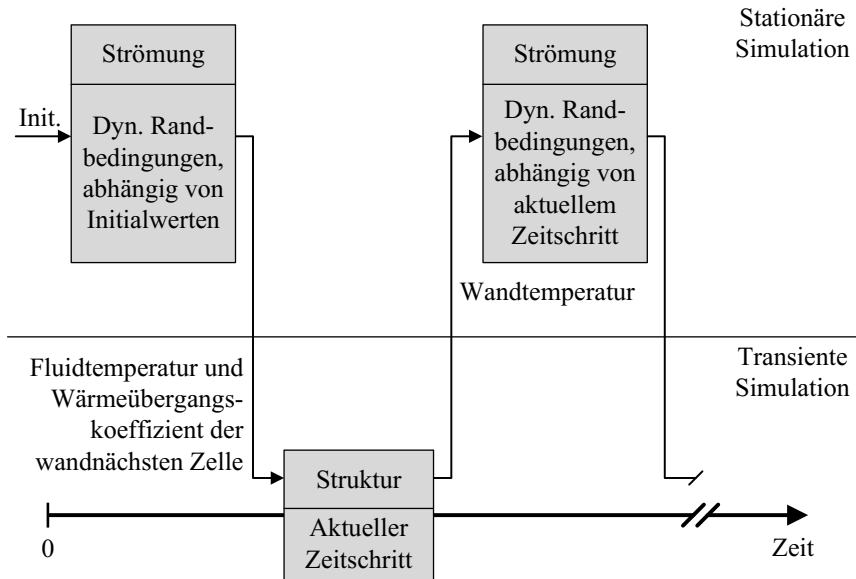


Abbildung 2.2: Kosimulationsschema nach Disch [20]

2.3 Kollektive in der Fahrzeugtechnik und im Thermomanagement

Ziel dieser Arbeit ist, Bauteiltemperaturkollektive vorherzusagen. Diese Häufigkeitsverteilungen repräsentieren die thermische Belastung von Bauteilen. Belastungen werden auch in anderen Fachgebieten häufig in Form von Kollektiven aufgezeichnet und für Auslegungszwecke verwendet.

Während Bauteiltemperaturkollektive die kumulative Häufigkeit des Auftretens einer Temperatur beschreiben, werden für mechanische Belastungskollektive die Häufigkeit von Wechselbelastungen betrachtet [57]. In Abhängigkeit der Spannungsamplitude ergibt sich eine Lastspielanzahl, die das Bauteil aushält. Dieser Zusammenhang kann in einer Wöhlerkurve dargestellt werden. Die sich ergebende Lastspielzahl ist für Metalle frequenzunabhängig [80].

In der Qualitätssicherung wird mit dem Fachwort „Belastungskollektiv“ eine Verweildauerklassierung oder Momentanwertzählung von Parametern, wie der Fahrgeschwindigkeit, der Motorleistung oder z. B. des Scheibenwischer-einsatzes, verbunden. Diese werden vor allem in Kundenfahrzeugen auf-gezeichnet. Auf diese Weise werden anonymisierte, zeitunabhängige und nur in begrenztem Maß mit einander verknüpfbare Daten gewonnen [6].

Diese beiden Ansätze lassen sich jedoch nicht direkt auf die Ermittlung von Bauteiltemperaturkollektiven übertragen. Die thermische Belastung wirkt nicht in Lastspielen sondern über die vorliegende Absoluttemperatur. Die Prämisse einer schädigenden Wechselbelastung gilt daher nicht. Das Prinzip einer Verweildauerklassierung der Bauteiltemperatur könnte direkt genutzt werden. Allerdings gehören Bauteiltemperaturen nicht zu den in Kunden-fahrten aufgezeichneten Parametern. Durch die klassierte Speicherung der Einzelparameter ist außerdem keine Analyse von Zusammenhängen der Parameter untereinander mehr möglich.

Das heißt zusammengefasst, dass neue Methoden entwickelt werden müssen, um Bauteiltemperaturkollektive vorhersagen zu können. Die derzeit verwen-deteten Dauerlaufversuche sind nicht prädiktiv einsetzbar, da ihre Ergebnisse erst in einer späten Entwicklungsphase zur Verfügung stehen. Sie bilden jedoch die Basis für die Entwicklung einer Prognosefähigkeit. Im Weiteren wird auf die in der Vergangenheit durchgeführten Analysen von Dauerlauf-daten eingegangen und zwei simulative Ansätze für die Ermittlung von kollektivartigen Temperaturinformationen dargestellt.

2.3.1 Fahrzeugdauerlauf als Bauteiltemperaturkollektivquelle

Die Analyse von Dauerlaufdaten mit dem Ziel, Temperaturkollektive vorherzusagen erfolgte fast ausschließlich in studentischen Arbeiten. Im Folgenden werden die Kernergebnisse dieser Arbeiten vorgestellt.

Ein klarer Zusammenhang in den analysierten Daten ist die grundsätzliche Korrelation von Außentemperatur und Bauteiltemperatur. Allerdings wird diese eingeschränkt durch eine Stagnation der Bauteiltemperatur bei sehr hohen Außentemperaturen. Dies wird auf einen Regelungseinfluss im Kühlsystem zurückgeführt [23].

Die Verteilung der Außentemperaturen, die im Dauerlauf auftreten, ist im Vergleich zu einer typischen kundenmäßigen Verteilung zu kälteren Temperaturen verschoben. Dies lässt sich mit den häufigen Nachtfahrten begründen [23]. Die Verteilung für Kunden kann z. B. aus Informationen zu Start- und Fahrzeiten, wie sie im Mercedes-Benz Verbrauchstest (MBVT, [9]) aufgezeichnet wurden, in Verbindung mit typischen deutschen Wetterdaten, z. B. am Standort Porta Westfalica [66], ermittelt oder einer Studie der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) [72] entnommen werden.

Um die Außentemperaturverteilung eines Kundenfahrprofils besser nachbilden zu können, wird eine Filterung der Gesamtdaten bezüglich der Außentemperatur durchgeführt [60]. Neben dem dominanten Außentemperatureinfluss zeigt sich, dass die Bauteiltemperatur bei konstanter Geschwindigkeit auch mit der Motorlast korreliert [23]. Problematisch ist bei einer Filterung, dass gerade die Randklassen oft gering besetzt sind. Dies schränkt die Möglichkeit einer Filterung ohne Verfälschung ein [60].

Die Korrelation von Last und Temperatur ist signifikant, jedoch lässt sich aus den Daten kein zeitlicher Zusammenhang oder ein Phasenversatz zwischen Last- und Temperaturanstieg feststellen [23]. Vor allem thermische Trägheit und Regelungseinflüsse verhindern ein weiteres Verfolgen dieses Ansatzes.

Stattdessen wird versucht, Teile der Dauerlaufdaten mit einem 1D-Kreislauf zu simulieren und so die Regelungseinflüsse abbilden zu können. Dabei ist

festgestellt worden, dass die komplexe Wahl der Startbedingungen die Ergebnisqualität signifikant beeinflussen [26]. Eine Vorhersage von Bauteiltemperaturen ist in jedem Fall nur mit einer 3D-Simulation möglich. Dafür werden jedoch noch deutlich mehr Randbedingungen, wie z. B. die Fahrgeschwindigkeit oder die Wärmeeinträge im Kühlmodul, benötigt [23].

Eine weitere direkte Auswertung der Dauerlaufdaten hat das Ziel, die Bedingungen für Veränderungen der Bauteiltemperaturen herauszukristallisieren. Dazu werden die Daten in eine Quantildarstellung gebracht. Sie ermöglicht eine visuelle Untersuchung der Streuung der Daten zwischen den Strecken sowie einen Vergleich von Bauteilen. Zusätzlich lassen sich Grenzwertüberschreitungen einfach erkennen [19, 60]. Es lassen sich jedoch auch so Ursache-Wirkungs-Prinzipien nicht herausarbeiten, da die nichtlinearen Effekte zu groß sind. Zusätzlich wird die Quantildarstellung gerade im Bereich hoher Temperaturen durch die kleine Anzahl an Datenpunkten eingeschränkt.

Eine direkte Nutzung von Dauerlaufdaten für die numerische Simulation ist bisher nicht möglich. Die im Rahmen der vorgestellten Arbeiten entwickelte und automatisierte Erzeugung von Bauteiltemperaturkollektiven wird jedoch aktiv von Fachabteilungen der Bauteilprüfung genutzt [71].

2.3.2 Simulation von Bauteiltemperaturen unter hochdynamischen Randbedingungen

Kollektivinformationen sind nicht nur für die thermische Absicherung über ein Fahrzeugleben notwendig, sondern auch für die vergleichsweise eher kurzzeitigen Einsätze unter den Extrembedingungen einer Rennstrecke. Haehndel hat in Zusammenarbeit mit verschiedenen Kollegen in mehreren Veröffentlichungen [32, 35–37] einen Ansatz beschrieben, Informationen über hochdynamische Temperaturverläufe zu erhalten. Diese Methodik ist neuartig in ihrem Ansatz, die Dynamik des Fahrzustands von der Dynamik der thermischen Antwort zu trennen.

Sein Ansatz basiert auf experimentell aufgenommenen Daten einer Rennstreckenfahrt. Er wendet eine kombinierte 1D- und 3D-Simulationsmethode an, um Bauteiltemperaturen zu bestimmen. Um die Ergebnisse effizient zu

berechnen, wird die Strömung nur zu bestimmten Zeitpunkten stationär berechnet und mit einer instationären Struktursimulation verbunden [32]. Dieser Ansatz lässt sich grob mit dem Vorgehen von Disch [20] vergleichen.

Die nötigen Kopplungspunkte werden so ausgewählt, dass nur die thermische Dynamik der Bauteile und nicht die volle Dynamik der Fahrzustände abgebildet wird. Gegenüber den Ursprungsdaten ergibt sich so eine Reduktion der notwendigen zeitlichen Auflösung. Dafür wird ein Waveletansatz genutzt, der in seinem Verhalten einem Tiefpassfilter ähnelt [36]. Zusätzlich verbessert er die Effizienz der Ressourcennutzung durch Wiederverwendung von berechneten Strömungsergebnissen [35]. Seine Anwendung bleibt jedoch auf die Rennstrecke begrenzt und es wird nur die Möglichkeit einer Ausweitung auf andere Lastfälle angesprochen [36]. In einer weiteren Veröffentlichung fokussiert er sich weiter auf das Zusammenspiel zwischen Thermomanagement und Aerodynamik im Rennstreckenbetrieb [37].

Die vorgestellte Methode basiert auf Messergebnissen als Eingangsparameter für die Simulation. Daher ist ihre Prognosefähigkeit eingeschränkt. Weiterhin bietet sie in ihrem veröffentlichten Umfang keine Möglichkeit, ein Bauteiltemperaturkollektiv über das Fahrzeugleben zu berechnen.

2.3.3 Simulation von Kühlmitteltemperaturverteilungen

Traussnig et al. [73] stellen 2016 eine Methode vor, die direkt auf die Vorhersage von Verteilungen der Bauteiltemperaturen über die Lebensdauer eines Fahrzeugs abzielt. Sie soll ebenfalls bereits in der frühen Entwicklungsphase einsetzbar sein und neben der TAG eine Bewertung des Energieverbrauchs und der Regelungsstrategie des Kühlsystems ermöglichen. Dafür werden 24-stündige Fahrzyklen mit entsprechenden Halte- und Parkzeiten aus Kundendaten ermittelt und in einem 1D-Simulationsnetzwerk als Randbedingungen vorgegeben.

Mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse sind Last und Dynamik als die beiden wichtigsten Parameter für die Definition von Fahrzuständen bestimmt worden. Sie ermöglichen die Ermittlung von vier typischen repräsentativen Kundenzyklustypen: zwei Stadtzyklen mit niedriger Last und niedriger, bzw.

mittlerer Dynamik, einem Autobahnzyklus mit hoher Last und niedriger Dynamik und einem Bergzyklus mit mittlerer Last und hoher Dynamik. In Verbindung mit verschiedenen Außentemperaturen und zusätzlichen Extremlastfällen ergeben sich 42 untersuchte Lastfall-Außentemperatur-Kombinationen. Mit einem 1D-Simulationsnetzwerk lassen sich Motorbetriebszustände und nachfolgend Medien- sowie Komponententemperaturen berechnen. Aussagen über die Temperaturverteilungen lassen sich durch eine Gewichtung der 42 berechneten Temperaturen ermitteln. Diese Gewichtung erfolgt basierend auf Vorgaben aus Entwicklungszielen.

In [73] werden Ergebnisse dieser Methode für die Regelung des Kühlsystems der Batterie eines hybridelektrischen Fahrzeugs gezeigt. Die Anbindung an ein 3D-Simulationsmodell ist bisher nicht geschehen und Aussagen über motorfernere Bauteile ohne Vorgabe von zusätzlichen Randbedingungen sind somit nicht möglich.

2.4 Fazit

In den Standardprozessen der thermischen Absicherung des Gesamtfahrzeugs werden 3D-Simulationsmodelle genutzt, um Bauteiltemperaturen vorherzusagen. Momentan ist es so jedoch nicht möglich, Bauteiltemperaturkollektive vorherzusagen. Als Ersatz werden in der Bauteilprüfung bisher Dauerlaufinformationen genutzt, die erst spät zur Verfügung stehen. Untersuchungen über die Standardprozesse hinaus sind für einen hochdynamischen Lastfall durchgeführt worden, der allerdings noch keine direkte Erweiterung auf vollständige Kollektive ermöglicht. Häufigkeitsinformationen sind außerdem bereits in Verbindung mit einem 1D-Simulationsnetzwerk verwendet worden.

Mit den Methoden, die in den oben beschriebenen Publikationen präsentiert werden, ist es nicht möglich, Bauteiltemperaturkollektive für die Nutzung in der Bauteilprüfung zu erzeugen. Diese Arbeit zeigt daher einen neuen Ansatz für die prädiktive numerische Simulation von Häufigkeitsverteilungen der

Bauteiltemperatur über ein Fahrzeugleben. Der Ansatz verbindet Häufigkeitsinformationen mit 3D-Simulationsmodellen, um Temperaturkollektive für Bauteile wie Elastomerlager vorherzusagen.

Stützpunktbasierter Ansatz zur Vorhersage von
Bauteiltemperaturkollektiven im Thermomanagement
des Gesamtfahrzeugs

Eller, J.

2017, XXII, 137 S. 53 Abb., 8 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-18689-0