

Kurzfassung

Die Wirkungsgradsteigerung des Antriebsstrangs steht seit Jahren im Fokus der automobilen Entwicklung. Neben der Steigerung der Effizienz des Verbrennungsprozesses selbst sowie einem zunehmendem Grad an Hybridisierung stehen nach wie vor Systeme zur Nutzung der Restwärme des Top-Cycles im Zentrum der Bemühungen. Dabei haben sich innerhalb der letzten Dekade insbesondere Systeme auf Basis eines Sekundärkreislaufs nach Clausius und Rankine als vielversprechender Ansatz hierfür herausgestellt. Solche Bottoming-Cycle werden dabei zumeist als Add-On System ins Fahrzeug integriert und nutzen den hocheffizienten Abgasmassenstrom als Wärmequelle. Das Fahrzeugkühlsystem dient hierbei meist als Wärmesenke.

Diese Systeme haben sich trotz zahlreicher Ansätze diverser OEMs und Systemlieferanten bisher nicht bis hin zum Serieneinsatz durchsetzen können. Ein nicht hinreichender Quotient aus Kraftstoffverbrauchsvorteil und Kosten sowie der zusätzliche Bauraumbedarf scheinen hierfür die Hauptgründe zu sein. Somit muss ein Systemansatz gefunden werden, der sowohl die Leistungsausbeute steigert als auch die Systemkosten sowie den Bauraumbedarf minimiert und dadurch einen Serieneinsatz dieser vielversprechenden Technologie attraktiviert.

Ein solches System wird im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt. Der Systemansatz nutzt dabei den Motorkühlkreislauf nicht als Wärmesenke, sondern integriert diesen als zusätzliche Wärmequelle neben dem Abgasmassenstrom in ein Einkreisystem. Auf einen herkömmlichen Kühlmittelkreislauf zum Wärmetransfer aus den Motorkühlkanälen in das Restwärmenutzungssystem wird dabei aus Effizienz-, Kosten- und Bauraumgründen verzichtet. Die Substitution des Motorkühlkreislaufs, dessen Komponenten sowie die Übernahme des Leitungsroutings ermöglichen eine kostengünstige und möglichst konfliktfreie Gesamtfahrzeugintegration bei gleichzeitiger Leistungssteigerung des Restwärmenutzungssystems gegenüber Add-On Systemen.

Das Systemdesign dieses integralen Ansatzes der Restwärmenutzung wird Schritt für Schritt vorgestellt, Randbedingungen erörtert sowie Komponenten und funktionale Zusammenhänge erklärt. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf der möglichst konfliktfreien Integration und dem sicheren Betrieb der sensiblen Wärmequelle Motor in den Restwärmenutzungskreislauf. Die Wirkungsgradsteigerung des Top-Cycle inklusive des Restwärmenutzungssystems in Form eines thermischen Antriebsverbunds unter Beibehaltung der gewohnten Systemrobustheit ist das Entwicklungsziel.

Anhand eines Versuchsaufbaus am Vollmotorenprüfstand wird darüber hinaus ein solches integrale Restwärmenutzungssystem der ersten Generation vorgestellt, Grenzen und Potentiale aufgezeigt sowie eine anforderungsgerechte Optimierung von Regelungsparametern hinsichtlich Prozesswirkungsgrad und Systemrobustheit durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zusammengefasst und hinsichtlich der Anwendung in verschiedenen Antriebsarchitekturen diskutiert.

1 Einleitung und Motivation

Die Automobilindustrie steht vor einem der größten Umbrüche in Ihrem über 125 Jährigen Bestehen [1]. Steigende Rohstoffpreise und immer strenger werdende Emissions- sowie Verbrauchsvorschriften¹ stehen im Konflikt zu Kundenwünschen nach größeren, luxuriöseren und leistungsstärkeren bzw. dynamischeren Fahrzeugen [5] [6]. Trotz steigender Zulassungszahlen elektrischer Antriebe ist der Verbrennungsmotor dabei nach wie vor mit großem Abstand die dominierende Antriebsquelle [7], deren Effizienzsteigerung in den vergangenen Jahren immer weiter vorangetrieben wurde. Reibleistungsreduzierung, Schichtung, Millerzyklen, Downsizing, Zylinderabschaltkonzepte, Aufladung und Direkteinspritzung sind dabei nur einige Vertreter der Verbrauchsreduzierungsmaßnahmen am Verbrennungsmotor selbst [8] [9] [10] [11]. Die sogenannten und vieldiskutierten „Quick Wins“ sind dabei weitestgehend als ausgeschöpft zu betrachten [12] [13] [14]. Neue Technologien und Denkansätze rücken schrittweise in den Fokus der Betrachtung. Effizienzmaßnahmen beschränken sich jedoch nicht nur auf den Verbrennungsmotor selbst, sondern müssen über den gesamten Antriebsstrang vorangetrieben werden, welcher sowohl aus Komfort-, Dynamik- als auch aus Verbrauchsgründen eine immer weiter voranschreitende Hybridisierung erfährt [15].

So nahm in Deutschland die Anzahl der Neuzulassung von Fahrzeugen mit hybriden Antriebssträngen gegenüber den jeweiligen Vorjahren um 76,4%, 53,8% und 83,7% in den Jahren 2017 bis 2019 stetig zu [16] [17] [18].

1.1 Die Effizienzsteigerung des Antriebsstrangs muss trotz Hybridisierung und Elektromobilität weiter voranschreiten

Hybridisierung wird dabei häufig als wichtiger Zwischenschritt hin zur Vision des vollelektrischen Fahrens gesehen [14], wobei diese Ansicht auch kontrovers diskutiert wird. So sind bis zur Massentauglichkeit des vollelektrischen Fahrens noch viele Herausforderungen zu meistern. Elektrische Leistungsfähigkeit des Netzes, Schnellladeinfrastruktur, Batterietechnologie², Wirtschaftlichkeit sowie eine tatsächlich bessere Umweltbilanz als bei verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen sind Herausforderungen, die bis hin zum Erreichen dieses wenigstens nationalen Zielbildes einer CO₂-freien Mobilität noch zu erbringen sind. Dabei besonders fraglich ist die Einbeziehung der Elektrofahrzeuge in den Flottenverbrauch des Herstellers mit 0 g CO₂/km [19]. Möglich macht dies, dass hinsichtlich der Verbrauchszertifizierung nur die sogenannte „Tank-to-Wheel“-Bilanz Beachtung findet. Somit fließen nur die Emissionen mit in die Bewertung ein, die bei der Wandlung des Inhalts des im Fahrzeug befindlichen Energiespeichers³ anfallen. Dies führt zu seiner starken Begünstigung der Elektromobilität gegenüber den übrigen Antriebskonzepten [20]. In einer holistischen Betrachtung, welche im Sinne eines globalen Klimaschutzes erfolgen sollte, müssen wenigstens die entstehenden Emissionen von der Gewinnung des Speicherinhaltes an Einzug in die Bewertung finden. Die gebräuchliche Bezeichnung

¹ Die CO₂-Flottenzielwerte, die im Rahmen der EG 443/2009 [2] bis zum Ende des Jahrs 2020 mit 95 g CO₂/km im herstellerübergreifenden Flottenverbrauch festgelegt wurden sind noch nicht erreicht. Unabhängig davon wurde eine weitere Reduzierung der CO₂-Emissionen um 37,5% des Flottenverbrauchs bis 2030 auf dann rund 59 g CO₂ bereits beschlossen [3]. Dies entspricht einer Reduzierung des Zertifizierungsverbrauchs von 4,0 l Benzin/100km auf äußerst ambitionierte 2,5 l/100km [4].

² Herausforderungen sind immer noch die Schnellladefähigkeit, thermische Beständigkeit, Dauerhaltbarkeit und nicht zuletzt die geringe spezifische Energiedichte, die zu einer großen Gewichtszunahme des Fahrzeugs führt.

³ Als Beispiele für Energiespeicher sind der Kraftstofftank, eine Batterie oder ein Gastank zu nennen.

dieser Bilanzierung ist die „Well-to-Wheel“-Bilanz⁴. Die Bevorteilung elektrischer Fahrzeuge schwindet, je nach verwendetem Strommix, stark, wird nicht die Tank-to-Wheel- sondern Well-to-Wheel-Bilanz für die Bewertung CO₂-neutraler Mobilität herangezogen. Wird die Bilanz gar Cradel-to-Grave aufgestellt, also um Produktion und Entsorgung der Fahrzeuge auf den gesamten Lebenszyklus erweitert, verschiebt diese sich zu Gunsten verbrennungsmotorisch getriebener Fahrzeuge.

So sehen **Velji, Kubach und Spicher** eine weiter anhaltende Dominanz des Verbrennungsmotors sowie durch dessen Weiterentwicklung einen entscheidenden Beitrag zur Senkung der CO₂-Emissionen und die E-Mobilität gar als Nischenanwendung, die ganzheitlich betrachtet höhere Kohlendioxid-Emissionen zu verantworten hat [21]. Auch **Koch** bescheinigt dem Elektromobil eine schlechtere CO₂-Bilanz im Vergleich mit verbrennungsmotorisch getriebenen Fahrzeugen [22]. Er plädiert für die Heranziehung der Well-to-Wheel-, besser der Cradel-to-Grave-Bilanz um einen „fairen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Antriebsformen herzustellen“ [23]. Weiter attestiert **Indra** dem Elektroauto bei deutschem Strommix eine um Faktor 1,6 schlechtere CO₂-Bilanz bei der Well-to-Wheel Betrachtung als seinem verbrennungsmotorischen Pendant [24]. **Gutzmer** spricht von einer CO₂-Emissionsäquivalenz vergleichbarer verbrennungsmotorischer und elektrischer Fahrzeuge bei rund 200.000 km [25]. **Romare und Dahllhög** beziffern die Vorbelastung durch Rohstoffgewinnung, Produktion und Recycling⁵ der Batterie gar mit 150-200 kg CO₂/kWh Batteriekapazität, weisen aber gleichzeitig auf die große Abhängigkeit dieser Zahlen vom verwendeten Strommix hin [26].

Dem Entkräften dieser Bilanzen durch die Verwendung von 100% Ökostrom bei Produktion und Laden entgegen zu halten ist, dass nicht der „lokal verwendete Strom“, sondern der globale oder wenigsten nationale Mix innerhalb eines zusammenhängenden Stromnetzes für eine Bilanzierung genutzt werden muss. Jede regenerativ erzeugte Wattstunde kann eine fossil erzeugte ersetzen und hat so innerhalb eines verknüpften Netzes den gleichen Impact auf die CO₂-Bilanz [27]. Unabhängig der Antriebsarchitektur gilt, dass „die Bewertung eines Kraftstoffs beziehungsweise Energieträgers hinsichtlich seiner Nachhaltigkeit, Effizienz, Emissionen und Kosten [...] vor dem Hintergrund einer gesamthaften Beurteilung der Systemkette von der primären Energiebasis bis zum Vortrieb am Rad („well-to-wheel“) erfolgen [muss]“ [28].

Stand heute ist ein ebenbürtiger Einsatz eines Elektrofahrzeugs, insbesondere bezogen auf Reichweite, Einsatzfähigkeit, globale CO₂-Emission und Ressourcenaufwände [29], gegenüber einem modernen konventionell betriebenen Fahrzeug nicht gegeben.

Eine realistische Option, eine ganzheitlich nachhaltige CO₂-neutrale Mobilität unter Weiterverwendung konventioneller Diesel und Ottomotoren zu ermöglichen, bieten synthetische Kraftstoffe [30] [31] [32] [33]. Mit den als „Power to X“ benannten Verfahren steht eine Möglichkeit zur Verfügung, synthetische Kraftstoffe in Form von Gasen oder Flüssigkeiten herzustellen. Der Vorteil dieser liquiden (Power-to-liquid) oder gasförmigen (Power-to-gas) Kraftstoffe im Vergleich zu konventionellen Energieträgern aus fossilen Kohlenwasserstoffen, liegt auf einem zeitlich geschlossenen Kohlenstoffdioxidkreislauf. Zur Erzeugung der synthetischen Kraftstoffe wird Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre gebunden, während fossile Energieträger über Millionen von

⁴ Wenn auch von fossilen Energieträgern abstammend, so hat sich dieser Begriff hinsichtlich des CO₂-Fußabdrucks antriebsartübergreifend etabliert.

⁵ **Romare und Dahllhög** merken an, dass ein wirkliches Recycling der Wertstoffe eines Batteriepakets aktuell nicht stattfindet. Gleichzeitig weisen jedoch darauf hin, dass aktuelle BEVs noch zu jung auf dem Markt sind, um nennenswerte End-of-Life Einheiten vorliegen zu haben. Weiter warnen Sie jedoch vor der Gefahr, dass es für ein Recycling aktuell keine ökonomischen Anreize gibt [26].

Jahren eingelagerte Kohlenstoffverbindungen innerhalb kürzester Zeit in die Atmosphäre freisetzen. [28]

Kommt bei der Herstellung Strom aus regenerativen Quellen zum Einsatz, so können diese Kraftstoffe sogar mit einer effektiven CO₂-Bilanz nahe Null erzeugt werden [31]. Im Gegensatz zu Elektrofahrzeugen haben Produktionsstätten eine konstante Netzintegration. So können Überkapazitäten der regenerativen Stromerzeugung, welche bereits heute vorhanden sind und teilweise gegen Bezahlung in andere Netze abgeführt werden müssen, für die Gewinnung von synthetischen Kraftstoffen eingesetzt werden⁶ [31] [34]. Die Produktion kann darüber hinaus lokal am Ort der Energiewandlung erfolgen⁷ und der Strom so in Form des Flüssigkraftstoffs gespeichert werden. Der Nachweis des effizienten Transports von Flüssigkraftstoffen ist bereits erbracht. Die hohe spezifische Energiedichte fossiler Energieträger, welche vergleichbar mit der synthetischer Kraftstoffe ist, ermöglicht bereits heute einen äußerst effizienten Transport in die Ballungsregionen dieser Welt [35] [36]. Des Weiteren stünden bestehende Tankstellen zur flächendeckenden Versorgung zur Verfügung [37], was große Vorteile im Vergleich mit dem Aufbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur mit sich bringt.

Nachteilig stellt sich dieses Energiekonzept in Bezug auf die bei der Energiewandlung in der Wärmekraftmaschine Motor entstehenden Verbrennungsprodukte⁸ dar, welche im Gegensatz zu batterieelektrischen Fahrzeugen vorhanden sind. Es entstehen, trotz globaler CO₂-Neutralität, lokale Emissionen, was in großen Ballungsgebieten zu den bekannten Herausforderungen führt. Für den urbanen Verkehr bleiben lokal emissionsfreie Fahrzeuge ein wichtiger Bestandteil. Eine Kombination beider Welten, beispielsweise in Form von Plug-In-Hybriden, bietet Lösungsansätze. Entsprechend fassen **Kirsten et al.** folgerichtig zusammen, dass Mobilität mit Nutzung regenerativer Primärenergie nicht zwangsweise reine Elektromobilität bedeutet. Ein anforderungsspezifischer Mix aus Batterieelektrischen- (BEV), Brennstoffzellenelektrischen- (FCEV) und Plug-In-Hybrid-Elektrischen (PHEV) Fahrzeugen mit unterschiedlich ausgeprägten Energiewandlungssystemen und Speicherkapazitäten ist möglich [28]. **Koch** teilt diese Auffassung des langfristigen Bedarfs eines ausgeglichenen Antriebsmixes von Fahrzeugen mit und ohne Verbrennungsmotor, die alle ein ähnliches CO₂-Potential haben [40]. Die Reduzierung des Kohlenstoffdioxidausstoßes bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wird dabei durch eine schrittweise Ablösung fossiler- durch synthetische Kraftstoffe unterstützt. Die Anwendung von Kraftstoffen bleibt nach **Beidl et al.** ein unverzichtbarer Bestandteil einer sichergestellten und verantwortungsbewussten Energiepolitik [41]. Mobilität und damit Kraftstoffe der Zukunft müssen dabei sozial-ökologisch verträglich sein. Dies wird nach **Jacob et al.** durch CO₂-Neutralität, nachhaltige Verfügbarkeit, Umweltverträglichkeit Wirtschaftlichkeit und Funktionalität definiert [42]. Eigenschaften, die mit Ausnahme der Wirtschaftlichkeit, von synthetischen Kraftstoffen bereits erfüllt werden.

Im Zuge der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollte die gesamte Wirkungskette eines mit e-Fuels betriebenen Automobils dabei nicht außer Acht gelassen werden. Diese ist, je nach den

⁶ Die Speicherung des Überschusses in stationären Akkumulatoren hätte zwar Wirkungsgradvorteile, ist jedoch aufgrund der Größe der zu puffernden Energie als nicht realistisch einzustufen.

⁷ Somit können Standortvorteile einzelner regenerativer Energiewandlersysteme genutzt werden. Beispielsweise die Errichtung von Solarkraftwerken an Orten hoher Sonneneinstrahlung, etwa in Äquatornähe.

⁸ Die Produkte einer idealen Verbrennung sind CO₂ und Wasser (H₂O). Neben diesen kann es bei den Rohemissionen durch eine nicht ideale Verbrennung unter anderem zur Bildung von Stickoxiden (NO_x) und Feinstaub kommen [38]. Diese mitunter stark diskutierten Emissionen sind bereits heute auf extrem niedrigem und stetig sinkendem Niveau. „Das NO_x-Emissionsproblem [kann] als technisch gelöst betrachtet werden“ und Feinstaubemissionen werden durch Einführung der RDE-Gesetzgebung und Partikelfilter abermals reduziert. [39]

Randbedingungen der Bewertung, dreimal [23] bis hin zu vier- bis sechsmal [36] schlechter als die eines Elektrofahrzeugs. Die Energiebereitstellung ist dabei jedoch deutlich flexibler und weniger abhängig von der schwankenden Größe bzw. Unstetigkeit der regenerativen Stromerzeugung. Neben dem weiter zu optimierenden Herstellungsprozess ist ein Großteil dieser Verluste dem Wirkungsgrad des Energiewandlers Motor zuzuschreiben. Es sind dieselben Verlustgrößen, die bereits bei heutigen, fossilen Kraftstoffen die Wirkungsgradkette von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor mindern und sind damit unabhängig vom zum Einsatz kommenden Kraftstoff zu minimieren. So ist ein Zugewinn an Effizienz des Energiewandlers Motor sowie des gesamten Antriebsstrangs in jedem Fall erstrebenswert. „Das Potenzial, auch nicht-fossile und damit CO₂-neutrale Kraftstoffe flexibel nutzen zu können, ist ein weiterer Garant für eine langfristige, nachhaltige Zukunftstechnologie.“ [39]

Während bei der Verwendung mit regenerativer Energie hergestellter synthetischer Kraftstoffe hauptsächlich die Betriebs- bzw. Erzeugungskosten treibende Kraft sind, so kommen bei Anwendung fossiler Energieträger neben den Kosten auch die Umweltaspekte zum Tragen. Die Frage, ob eine konsequente Evolution, nicht gar eine Revolution des hybriden Antriebsstranges den Vorsprung verbrennungsmotorisch getriebener Fahrzeuge ausbauen kann und somit eine lohnenswerte Betrachtung darstellt, muss gestellt werden.

1.2 Chancen durch Evolution des Antriebsstrangs mittels Restwärmenutzung

Eine Evolution kann hierbei die Integration einer Restwärmenutzungsvorrichtung sein. Durch den thermodynamisch eingeschränkten Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors bzw. -prozesses, als Top-Cycle der Energiewandlung, bieten viele verschiedene Ansätze Möglichkeiten, Restwärmen nutzbar zu machen. Neben Thermoelektrischen Generatoren (TEG), Stirling- und Jouleprozessen haben sich hier Systeme auf Basis von **Clausius und Rankine** in Form eines **Bottoming-Cycles** bzw. **Sekundärkreislaufs** als vielversprechendster Ansatz herausgestellt [12] [43]. Im Gegensatz zur Wirkungsgradsteigerung durch regeneratives Bremsen von hybridelektrischen Fahrzeugen (HEV), die insbesondere kinetische Energie beim Verzögern wiedergewinnen, wird durch Restwärmenutzungssysteme (RWN-Systeme) ein bisher ungenutzter Anteil an Primärenergie aus dem Top-Cycle rekuperiert. Hierdurch kann der Wirkungsgrad des Energiewandlungsprozesses vergrößert werden, wobei die Funktionalitäten der hybriden Rekuperation aufgrund des situativ versetzten Eintretens davon unberührt bleiben. Vielmehr bilden hybride Antriebsstränge die Voraussetzung zur Einbindung solcher Sekundärkreisläufe im Pkw, da sie in der Lage sind die rekuperierte Leistung in elektrischer Form aufzunehmen und zu verwerten⁹ [44]. Die Entlastung des Generators durch die Generierung elektrischer Leistung in der Größenordnung Kilowatt wird einen habhaften Kraftstoffverbrauchsvorteil bzw. große CO₂-Reduzierungspotential aufweisen [45].

Auch wenn diese Technologie bereits in mehreren Generationen in Form von **Add-On Systemen** von Fahrzeugherstellern (OEM) und Zulieferern entwickelt und betrachtet wurde, ist zum heutigen Zeitpunkt kein solches System kommerziell im Serienfahrzeug verfügbar. Der Grund hierfür ist in erster Linie in den Systemkosten und dem noch nicht ausreichenden Quotienten aus selbigen und CO₂-Einsparpotential¹⁰ zu finden.

⁹ Eine direkte mechanische Einspeisung der rekuperierten Leistung wird im Pkw aufgrund des meist sehr instationären Fahrverhaltens und großen Drehzahlbands als zu verlustträchtig angesehen (vgl. **Kapitel 3.1**).

¹⁰ Dieses Reduzierungspotential wird in den entsprechenden Zertifizierungszyklen ermittelt. Restwärmenutzungssysteme können ihr Potential dort oft nicht hinreichend zur Geltung bringen, da diese eine

1.3 Die Revolution des Antriebsstrangs durch Tiefenintegration und Substitution

Als Revolution hingegen kann man den Ansatz einer tiefgreifenden Integration des thermischen Rekuperationssystems in den hybriden Antriebsstrang eines Fahrzeugs bezeichnen.

Ein solches **Integrales Restwärmenutzungssystem** (IRWN-System) zeichnet sich dadurch aus, dass sich die thermische Rekuperation mittels Sekundärkreislauf nicht nur den von der Antriebseinheit bzw. dem Verbrennungsmotor gegebenen Randbedingungen anpasst, sondern ein Wirkungsgradmaximum aus dem Verbund der beiden Einheiten angestrebt wird. Durch geschicktes Kreislauf- und Systemdesign wird im Rahmen dieser Arbeit ein System vorgestellt, das es ermöglicht die thermische Rekuperation und den Verbrennungsmotor in die neue, gemeinsame Antriebseinheit zu integrieren. Neben Kosten und Gewichtsvorteilen durch Substitution bestehender Komponenten werden Themen wie Bauteilschutz, Reibleistungsreduzierung, sowie Optimierung von Verbrennung und Exergieangebot zur Rekuperation vereint und hinsichtlich eines Maximums des Gesamtwirkungsgrads optimiert. Diese neue, gemeinsame Antriebseinheit bestehend aus Verbrennungsmotor und thermischer Rekuperation wird nachfolgend auch als **thermischer Antriebsverbund** bezeichnet.

Die Optimierung des Exergieangebots des Top-Cycles zur Aufnahme in den Sekundärkreislauf lässt sich durch mehrere Faktoren beeinflussen. Zum einen kann man sich neben der aktuell zumeist ausschließlich genutzten Abgasexergie (vgl. **Kapitel 2.3**) noch weiterer Quellen bedienen, etwa der heute über das Kühlmittel abgeführten Wärme, zum anderen lässt sich die Zahl der Wärmeübergänge reduzieren und das Temperaturniveau der vorhandenen Restwärme wenigstens in niedrigen bis mittleren Lastbereichen erhöhen. Dies ist sowohl für die Rekuperationsanwendung, als auch für den Verbrennungsmotor vorteilhaft (vgl. **Kapitel 4.1**).

Die energetische Optimierung des Wärmehaushaltes zur Wirkungsgradsteigerung des Fahrzeugantriebs, bestehend aus dem Verbund von Verbrennungskraftmaschine und nachgeschalteter Rekuperationseinheit, soll im Zuge dieser Arbeit vorgestellt, beschrieben und auf Umsetzbarkeit sowie Potential untersucht werden. Im Fokus dabei steht die Komponenten- und damit Kostenreduktion gegenüber Add-On-Systemen.

Es hat sich in der Vergangenheit bei vielen Systemen bewährt, diese zunächst als „Add-On“-System auf dem Markt zu etablieren, sodass dieses zum einen in verschiedene Antriebsstrangs- und Fahrzeugkonfigurationen als Sonderausstattung gewählt werden und zum anderen erst schrittweise eine tiefe Integration ins Gesamtfahrzeug¹¹ erfolgen kann. Diese schrittweise Integration kann beispielsweise sehr gut an der Integration der Klimaanlage nachvollzogen werden. Beim ersten Einsatz einer Klimaanlage in einem Pkw, welche die Firma C&C Kelvinator 1930 in einen Cadillac integrierte, wurde ein eigener Verbrennungsmotor zum Antrieb des Kompressors verbaut [46]. Der entstehende Antriebsbedarf wurde jedoch alsbald durch Anbindung an den Riementrieb des Fahrzeugmotors gedeckt. Die Klimaanlage¹² selbst blieb Jahrzehnte lang Sonderausstattung. Das Fahrzeug hatte neben der Erzeugung der

gewisse Motorlast und Initialisierungszeit benötigen, um effizient arbeiten zu können. Sie sind daher eher als realverbrauchsminierend zu bewerten, was Amortisationsrechnungen erschwert.

¹¹ Dies geschah bisher meist Verbunden mit der Erzeugung von Abhängigkeiten und gegenseitigen Beeinflussungen mit weiteren Teilsystemen.

¹² Der Begriff Klimaanlage hat sich für die Bezeichnung der Möglichkeit zur Luftkühlung mittels eines Kaltdampfprozesses im zugehörigen Kältekreislauf etabliert. Selbiger soll hier bezeichnet werden. Der Begriff Klimaanlage bezeichnet genau genommen die Möglichkeit zur Regelung der Luft in geschlossenen Volumina hinsichtlich Temperatur, Feuchtigkeit und Luftwechselrate.

*Kälteleistung für die Kabinenklimatisierung keine weitere oder gar zwingende Verknüpfung, was der Definition (vgl. **Kapitel 2.4.1**) nach ein Add-On System darstellt. Selbst die schrittweise Integration von Handschuhfach- und/oder Getränkeköhlern ändert nichts an diesem Systemstatus. Erst die Verwendung von Hybrid- und Traktionsbatterien, deren Funktionalität für die Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs unabdingbar ist, sorgen durch die benötigte Kälteleistung zur Kühlung derselben für den Aufstieg der Klimaanlage zum integralen Fahrzeugsystem.*

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach erfolgter bedarfserörternder Einleitung werden die zum Verständnis der späteren Ausführungen benötigten Grundlagen im **Kapitel 2** diskutiert. Dies bezieht die heute als Stand der Technik anzusehenden fahrzeugspezifischen Rand- bzw. Ausgangsbedingungen für die Implementierung eines Restwärmenutzungssystems mit ein. So werden insbesondere die Komponenten des bestehenden Motorkühlkreislaufs in Design, Funktion und hinsichtlich des Gesamtfahrzeugpackages erörtert. Darüber hinaus werden system- und kreislaufspezifische physikalische Grundlagen betrachtet, mit deren Hilfe sowohl die darauf folgende Einführung in die automobilen Restwärmenutzung als auch die Besonderheit der hier untersuchten Ausführungsform erschlossen werden kann. Die Auslegungsphilosophie bzw. die Methodik des Systemdesigns werden im Anschluss in **Kapitel 3** vorgestellt und der Rückschluss auf heute bestehende Strukturen bzw. vorteilige Ausführungsformen gezogen. Unterschiede zwischen real darstellbaren und idealen Bauteilen werden ebenso diskutiert, wie eine möglichst holistische Eingliederung des Systems in bestehende Fahrzeugstrukturen. Das so im Detail vorgestellte Systemlayout wird anschließend mittels Messergebnissen aus einem Vollmotorenprüfstand unter Variation von Prozessparametern hinsichtlich Darstellbarkeit, Systemverhalten, Regelungsgrößen und Wirkungsgrad in **Kapitel 4** beleuchtet. In **Kapitel 5** werden die Erkenntnisse der vorausgegangenen Kapitel zusammengetragen und sowohl hinsichtlich Wirkungsgradsteigerungen bzw. Erweiterungen des Sekundärkreislaufs, als auch des Top -Cycles ein Ausblick gegeben. Zuletzt wird eine Prognose des künftigen Antriebsstranglayouts eines thermischen Antriebsverbands aus RWN-Kreislauf und Verbrennungsmotor vorgestellt.

2 Fahrzeugspezifische und thermodynamische Grundlagen der Restwärmenutzung

Zusammenhänge und Gedanken im Rahmen dieser Arbeit basieren auf einem Grundwissen über die fahrzeugseitigen Randbedingungen, wie auch einige essentielle thermodynamische Grundlagen. Die Voraussetzungen zum Verständnis der energetisch optimierten Systemauslegung eines Integralen Restwärmenutzungssystems werden in **Kapitel 2.2** beschrieben, während in **Kapitel 2.3** die Grundlagen der thermischen Rekuperation und in **Kapitel 2.4** eine detaillierte Beschreibung der Kreislaufkonfigurationen auf Basis von Clausius und Rankine erfolgen. Die zur fahrzeugseitigen Umsetzung und Integration erforderlichen Kenntnisse der Kühlsystemarchitektur und der Wärmequellen¹³ und -senken werden im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

2.1 Das Fahrzeugkühlsystem als Basis für Integration und Substitution

Neben dem Verbrennungsmotor selbst sind viele weitere Wärmequellen¹³ und -senken sowie Arbeitsmaschinen an das Fahrzeugkühlsystem angeschlossen. Abbildung 2.1 zeigt das Fahrzeugkühlsystem eines in Serie befindlichen Hybridfahrzeugs mit Hochtemperatur- (HT) und Niedertemperaturkühlkreisläufen (NT1 und NT2). Mit Ausnahme des Motors¹⁴ sowie des Getriebes und der getriebeintegrierten E-Maschine, welche im Zuge der Übersichtlichkeit in der Darstellung ausgenommen werden, sind alle kühlmittelführenden Komponenten dargestellt.

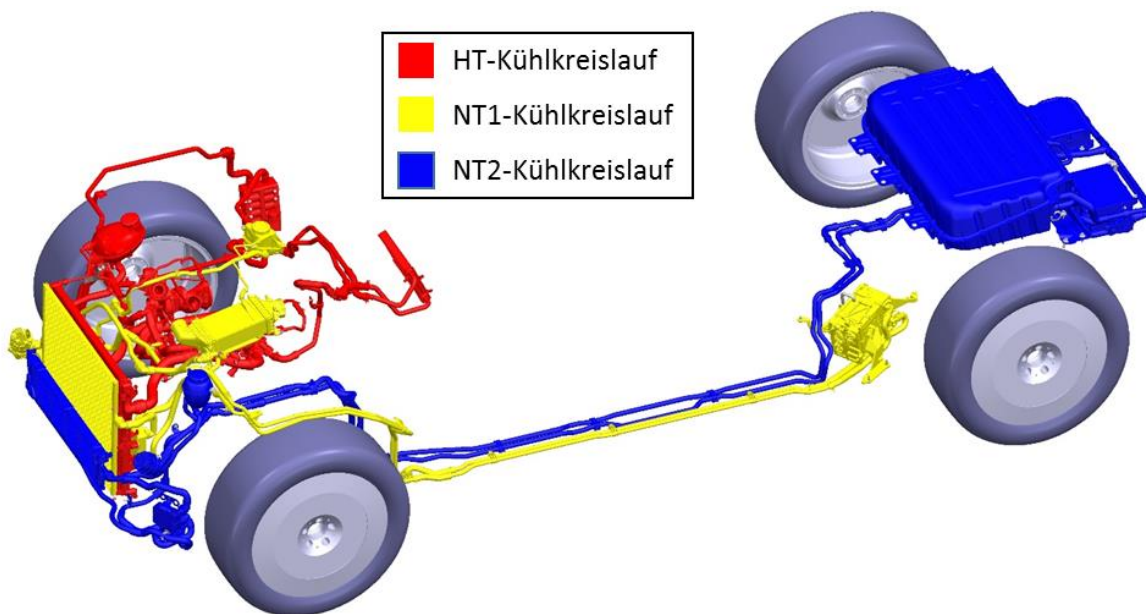


Abbildung 2.1: Darstellung der konventionellen Fahrzeugkühlkreisläufe eines Hybridfahrzeugs mit aufgeladenem 4-Zylinder Ottomotor

¹³ Es gibt genau genommen in einem Fahrzeug mit konventionellem Antriebsstrang nur eine Wärmequelle, den Verbrennungsmotor selbst. Jede andere als „Wärmequelle“ fungierende Komponente bezieht ihre Energie aus dem Verbrennungsprozess, ist also gleichermaßen Energiesenke für selbigen. In der einschlägigen Literatur werden jedoch alle Komponenten die Energie in Form von Wärme an die Umgebung oder ein Kühlmedium abgeben als Wärmequelle für die aufnehmenden Stoffströme bezeichnet, entsprechend auch in dieser Arbeit.

¹⁴ Es fehlen somit die motorinternen Kühlkanalstrukturen und der angeflanschte Kühlmittel-Öl-Wärmeübertrager als kühlmittelbenetzte Oberflächen.

Sowohl die Komplexität der Kreisläufe sowie das Vorhandensein im gesamten Fahrzeug sind ersichtlich. Die Packagerelevanz für das Gesamtfahrzeug, die sich durch etwaige Änderungen der zu konditionierenden Komponenten bzw. der korrespondierenden Leitungsführung ergibt, wird deutlich.

Nachfolgend werden für ein solches Fahrzeug mit aufgeladenem Ottomotor die Kühlkreisläufe sowie die darin enthaltenen Komponenten und Regelungsgrößen kurz vorgestellt. Der Kältekreislauf, da nicht direkt an der Rekuperation teilnehmend, sei hier ausgenommen. Konventionelle Fahrzeugkühlsysteme werden mit einem Kühlmittel bestehend aus einer Mischung aus Wasser und Kühlerschutzmittel (Volumenanteil 50%) betrieben und arbeiten mit einem maximalen Betriebsdruck von 2,5 bar absolut [47].

2.1.1 Niedertemperaturkühlkreisläufe

Niedertemperaturkühlkreisläufe werden in Fahrzeugen dann eingesetzt, wenn Komponenten mit entsprechender Wärmeentwicklung oder Beaufschlagung nicht oder nicht sinnvoll mit Luft zu kühlen bzw. die vorherrschenden Temperaturen im Hochtemperaturkühlkreislauf (**Kapitel 2.1.2**) zu hoch für eine Anbindung an selbigen sind. Neben der entsprechenden Kühlmittelpumpe, dem Ausgleichsbehälter und dem Kühler im Frontend des Fahrzeuges finden sich bei Fahrzeugen mit konventionellem Antriebsstrang meist zwei zu kühlende Komponenten im NT1-Kreislauf. Diese sind der Ladeluft-, sowie der Getriebeölkühler [48] [49]. Fahrzeuge, deren Antriebseinheit etwa aufgrund einer stark ausgeprägten Hybridisierung noch weitere einzubindende Komponenten benötigen, haben eine entsprechend komplexere und leistungsfähigere NT-Kreislaufstruktur. In diesem Fall finden sich beispielsweise Leistungselektronik und DC/DC Wandler im selben NT1-Kreislauf, wie Ladeluft- und Getriebeölwärmeübertrager wieder. Temperatursensiblere Komponenten wie OnBoard-Lader und HV-Batterien werden jedoch, insbesondere mit zunehmender Leistungsdichte, in einem separaten NT2-Kreislauf, auf niedrigem Kühlmitteltemperaturniveau, sowie einer optionalen Anbindung an den Kältekreislauf betrieben¹⁵. [50] [51] [52] [53].

Das Temperaturniveau des Kühlmittels unterscheidet sich je nach Komponente bzw. deren Anordnung, kann aber in der Größenordnung $T_{KM_max} \leq 60^{\circ}C$ (NT1) bzw. $T_{KM_max} \leq 35^{\circ}C$ (NT2) vor Kühlereintritt angesehen werden. [49]

Eine Regelung der Kühleraustritts- bzw. Komponenteneintrittstemperatur zum Beispiel über ein Thermostatventil und zugehörigen Kühlerbypass erfolgt im Niedertemperaturkreislauf in der Regel nicht. Das Getriebeöl besitzt bei Anschluss an den Kühlmittelkreislauf einen eigenen Thermostaten auf der Ölseite und für alle anderen Wärmequellen entstehen keine Nachteile durch zu geringe Temperaturen¹⁶. Damit besteht die thermomanagementseitige Aufgabe durch eine dem jeweiligen Bedarf angepasste hydraulische Abstimmung des Kreislaufs und einer ausreichenden sowie sinnvollen Positionierung der Wärmesenke im Kühlmodul (vgl. **Kapitel 2.1.4**) des Fahrzeugs.

¹⁵ Eine Alternative zu dieser Art der Traktionsbatterie Kühlung bietet die Direkttemperierung mittels Kältemittel.

¹⁶ Ausnahme kann ein integrierter Ladeluftkühler sein. Auch wenn niedrige Ladelufttemperaturen aus Verbrauchs- und Effizienzgründen zu begrüßen sind, besteht die Gefahr einer Kondensation von Wasser, die entsprechend konstruktiv berücksichtigt werden muss.