

Wärmesimulation in der Entwicklung eines Bus-Elektroantriebs Heatsimulation During the Development of a Bus E-Drive

Dipl.-Ing. (FH) **R. Altwater**, Dipl.-Ing. (FH) **P. Boch**, ZF Friedrichshafen AG,
Friedrichshafen

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt, wie ein Entwicklungsprojekt durch Wärme- und Fluidsimulation in allen Projektphasen unterstützt werden kann. Beispielhaft wird dies an der Entwicklung eines elektrischen Radnabenantriebes gezeigt. Dabei wird mit einem geringen Wissensstand in der Projektierungsphase begonnen. Dieser Wissensstand wird durch die Simulation stetig erweitert. Mit dem Produkt steht dann ein abgeglichenes detailliertes Simulationsmodell bereit. Während des Projektes wurde dabei mehrfach die Prozesskette - einfache Rechnung, Konstruktion, Versuch, detailliertes Modell, Konstruktion, Versuch - ausgeführt. Zum Abschluss wurde für einen Stadtbus ein Kühlsystemauslegungsvorschlag gemacht.

Abstract

The present article describes how to support a development project by heat and fluid simulation in all project stages in the example of the development of an electric wheel hub drive unit. The project starts at a low know-how level in the planning stage, which is then enhanced continually by simulation. A detailed and adapted simulation model will then be available with the finished product. The process chain - simple calculation, design, testing, detailed model, design, testing, is repeatedly carried out during the project. Finally, a design proposal for the cooling system of a city bus is shown.

1 Einleitung

Mit wachsendem Umweltbewusstsein steigen auch die Anforderungen nach umweltfreundlichen Antriebslösungen für Stadtbusse. Elektrisch betriebene Stadtbahnen und Oberleitungsbusse erfüllen die Forderungen nach Umweltverträglichkeit innerhalb der Ballungsräume seit langem mit sehr hoher Akzeptanz. Bei den mit Verbrennungsmotoren angetriebenen Stadtbussen bleiben trotz der schon verringerten schädlichen Emissionen aber immer noch Wünsche offen. Von den Entwicklungsforschritten bei der Brennstoffzellentechnik und den Hochleistungsbatterien wird erwartet, dass technische Lösungen für Null-Emissionsfahrzeuge in den nächsten 10 Jahren serienmäßig zur Verfügung stehen werden. Damit rückt der elektrische Antrieb in den Mittelpunkt des Interesses. Um hier ein geeignetes Produkt anbieten zu können, befasst sich die ZF Friedrichshafen AG seit 1993 intensiv mit elektrischen Antrieben für Stadtbussysteme.

Untersuchungen von elektrischen Antriebsstrangvarianten zeigten, dass sich der Radnabenantrieb besonders gut für den Stadtbuss eignet. Die kompakte Bauweise mit wenigen Bauteilen und die hohe Leistungsdichte erlauben eine relativ freie Gestaltung der Buskonstruktion. Um die spezifizierte Lebensdauer bei der kompakten Bauweise zu gewährleisten, dürfen die Komponenten in keinem Betriebszustand Grenztemperaturen überschreiten. Dies führte sehr früh zur Einbindung der Wärmeberechnung, die das Projekt dann mit verschiedenen Berechnungen und Simulationen unterstützte. Dadurch war es möglich,

- auf Designdetails Einfluss zu nehmen,
- Randbedingungen für Auslegung und Versuche festzulegen,
- Lebensdaueroptimierungen durchzuführen z.B.: durch Vermeiden von Hotspots und damit die
- Kosten planbarer zu machen.

In diesem Projekt wurde in der Regel zuerst eine Berechnung durchgeführt, um die Machbarkeit sicherzustellen und daraus Randbedingungen für die Konstruktion und notwendige Messungen abzuleiten. Durch mehrfaches Anwenden der Arbeitsschritte Konstruktion, Berechnung und Versuch wurde zielstrebig das Produkt verbessert. Mit zunehmender Projektlaufzeit wurden die Simulationsmodelle immer detailreicher und genauer. Das geometrieunabhängige Programmsystem SINDA/FLUINT eignet sich

hervorragend um bedarfsorientiert sowohl einfache als auch detaillierte und komplexe Netzwerkmodelle nebeneinander simulieren zu können.

2 Projektentwicklungsschiene

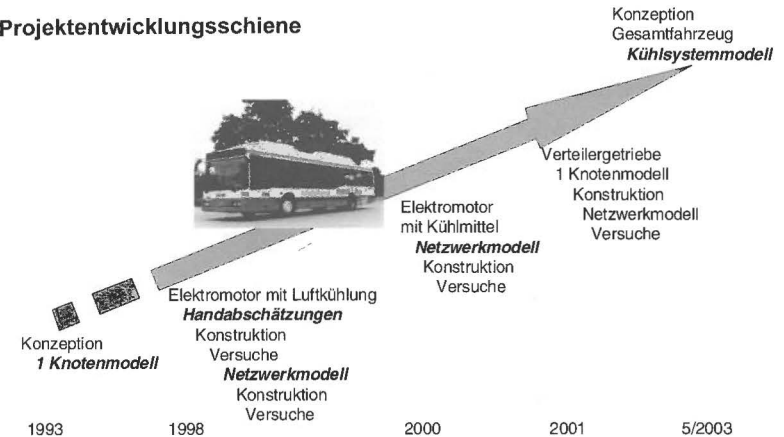


Bild 1: Projektentwicklungsschiene

In Bild 1 ist die zeitliche Abfolge und die steigende Komplexität erkennbar. Fünf Arbeitsblöcke, bei denen die ganze Palette der Wärmerechnung angewendet wurde, wurden bearbeitet. In drei Blöcken wurde die Prozesskette Rechnung, Versuch und Abgleich praktiziert. Die in Bild 1 kursiv und fett gekennzeichneten Punkte werden näher dargestellt. Der Elektroantrieb ist heute für den Kleinserieneinsatz fertig entwickelt und kann nun in verschiedene Busse appliziert werden.

3 Konzeptuntersuchung

Für diese Untersuchung standen nur geringste Informationen bereit. Eine Motor- und Radtriebkonstruktion war noch nicht vorhanden. Informationen über den Bus waren sehr gering, daher wurde mit einem Einknotenmodell gerechnet. Der virtuelle Stadtbuss wurde auf einer bergigen Strecke simuliert. Bild 2 zeigt schematisch das Vorgehen. Zuerst wurde eine Streckensimulation ausgeführt und deren Ergebniszustandsgrößen an das instationäre Ein-Knoten-Wärmemodell weitergereicht. Damit konnte dann eine mittlere Elektromotortemperatur gerechnet werden.

Das einfache Modell berücksichtigt:

- 2 Lager mit last- und drehzahlabhängigen Verlusten
- Elektromotor mit 15,8 kW Verlustleistung bei Nennlast
- die Wärmekapazität des gesamten Motors mit 500 kJ/K
- eine Luftkühlung über Rippen mit 1,73 m² Oberfläche und
- die Umgebungstemperatur von 45°C

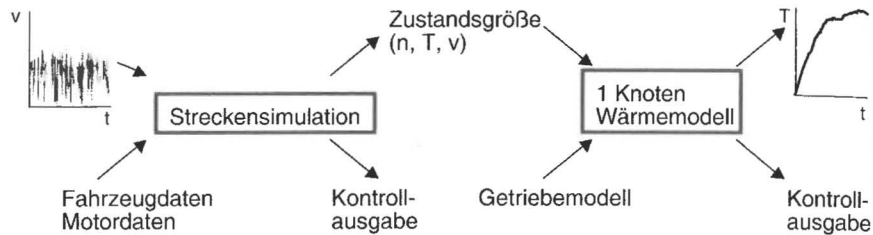


Bild 2: Rechenablauf Streckensimulation und instationärer Wärmerechnung

Das Ergebnis (Tabelle 1) zeigt eine von der Luftkühlung dominierte mittlere Motortemperatur nach 54 Minuten Fahrzeit.

Kühlungsbedingung	Konv. Wärmeübergang	Mittlere Motortemperatur
Mittel	7,5 bis 59 W/m ² K	91 °C
Schlecht	3,5 bis 28 W/m ² K	125 °C

Tabelle 1: simulierte max. mittlere Motortemperatur

Mit der Streckensimulation wurde eine mittlere Motorverlustleistung von ca. 4 kW errechnet. Als wesentliche Erkenntnis aus der einfachen Simulation lässt sich ableiten:

- das Projekt erscheint machbar,
- die Luftumströmung bestimmt wesentlich das Temperaturniveau.

Da über die Luftkühlung keine Daten vorlagen, wurden Messungen angeregt.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden Kühlrippen untersucht. Diese Untersuchung ergab die Konstruktionsempfehlungen:

- Zwangskühlung durch einen Ventilator,
- eng anliegender Kasten zur Luftführung um die Rippen und
- viele dünne Alu-Rippen.

4 Rippen auslegen, messen und Rechnung abgleichen

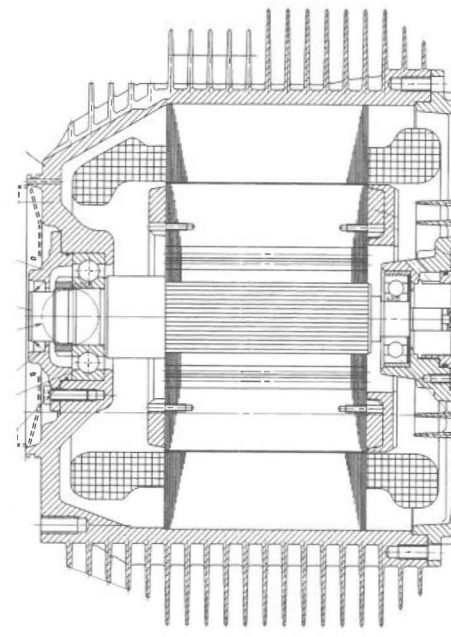


Bild 3: E-Motor mit Rippen

Nachdem ein Konstruktionsvorschlag (Bild 3) vorlag, wurden die Rippen nachgerechnet, und mit den Anforderungen an eine ausreichende Kühlung verglichen. Hierfür wurde der Berechnungsansatz des VDI Wärmeatlas verwendet. Für diese Arbeiten wurde angenommen:

- Kühlluft 4 m/s entspricht 350 m³/h,
- Kühllufttemperatur 23°C
- mittlere Verlustleistung 3 kW.

Damit rechnet sich die mittlere Motor- und Luftaustrittstemperatur zu 71°C und 46,7°C.

Für die Prüfstandsmessungen

wurde der Elektromotor mit einer Blechverkleidung versehen und mit vier Messstellen ausgestattet.

Die Messung wurde mit den Messstellen nach Bild 4 ausgeführt, in das auch einige Messergebnisse eingetragen sind. Die Messgenauigkeit der Messeinrichtung beträgt ca. 1°K was der Abweichung zwischen Rechnung und Messung entspricht.

Die Raumluft wird oben von einem Lüfter angesaugt und über die Rippen geführt. Unter dem Elektromotor ist der Luftaustritt. Die Temperaturmessstellen auf dem Elektromotor sind entlang des Umfangs am Rippengrund und einmal an der Rippenspitze angeordnet. Wie erwartet, bringt die seitliche Messstelle einen repräsentativen Messwert, der mit der Vorausrechnung gut übereinstimmt.

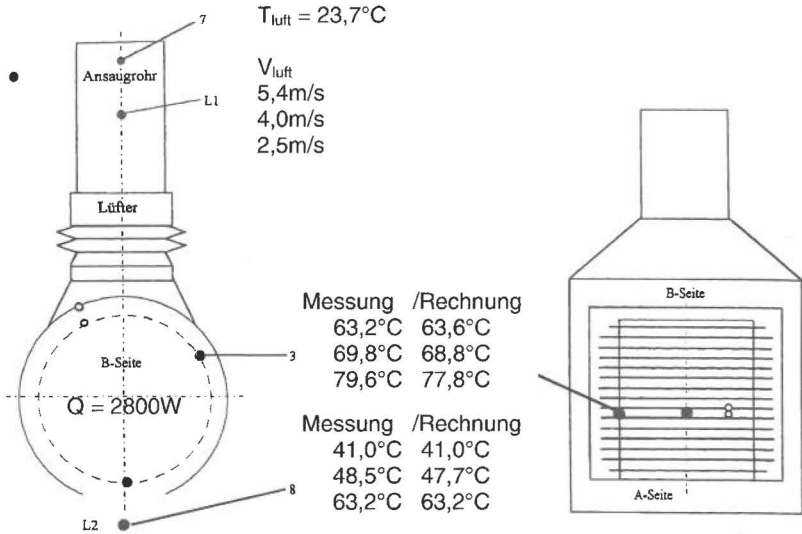


Bild 4: Prüfstandsskizze mit Messstellen

5 Testbetrieb des Elektromotors

Der Elektroradnabenantrieb besteht aus einem Elektromotor mit Rippen (Bild 3) und einem Radnabengetriebe. Er wurde in 24 Stadtbusse wie folgt eingebaut:

- 6 Hybridbusse (Dieselmotor 185 kW , 2 Radnabenmotoren, ZEBRA-Batterien), Bild 5
- 17 Hybridgelenkbusse (Dieselmotor 220 kW, 4 Radnabenmotoren)
- 1 Brennstoffzellenbus (Brennstoffzelle 150 kW, 2 Radnabenmotoren)

Umfangreiche Testfahrten, teilweise im Linieneinsatz, zeigten die Leistungsfähigkeit des entwickelten Antriebssystems. Zusammen fuhren alle Prototypen über 4 Mio. km. Bei den begleitenden Messungen stellten sich am Wickelkopf des Elektromotors Spitzentemperaturen bis 120°C ein. Keine gemessene Temperatur lag über ihrem Limit, was eine hohe Lebensdauer erwarten lässt. Demgegenüber konnten die emissionsfreien Energiequellen (Batterien und Brennstoffzellen) im Praxistest bezüglich Handhabung und Zuverlässigkeit noch nicht überzeugen.



Bild 5: Hybridbusse (Dieselmotor 185 kW , 2 Radnabenmotoren, ZEBRA-Batterien)

Diagramm 1 zeigt einen Haltestellenzyklus mit Motordrehzahl (NA1), Spannung (U), Stromstärke (IWR), Drehmoment (TA1) und Umgebungstemperatur (TRA). Das instationäre Temperaturverhalten zeigt Diagramm 2. Dabei erwärmt sich der Elektromotor bis zum 56. Zyklus stetig. Ab dem 57. Zyklus, bei dem der Lüfter

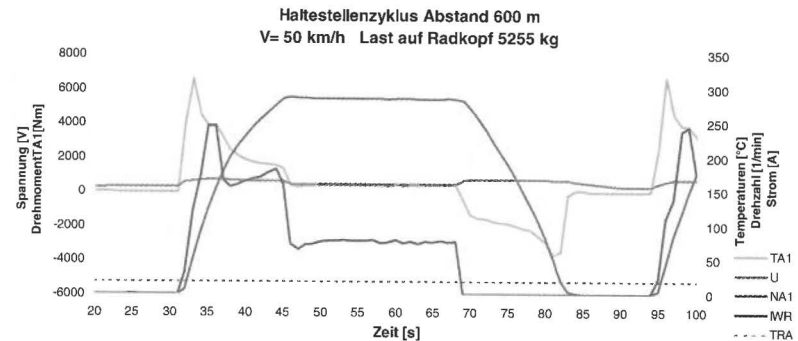


Diagramm 1: Testzyklus

mittläuft, stabilisiert sich die Temperatur im Wickelkopf, während die anderen Temperaturen sogar sinken. Durch den langsamen Temperaturanstieg und die Stabilisierung bei Lüfterbetrieb liegt ein thermisch gutmütiges Verhalten vor.

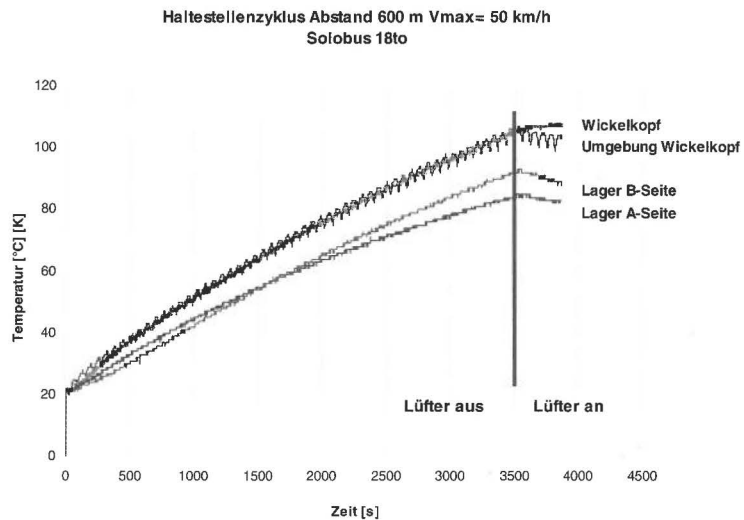


Diagramm 2: Temperaturverlauf des Elektromotors mit dem Haltestellenzyklus

6 Flüssigkeitsgekühlter Elektromotor

Wie aus Kapitel 5 ersichtlich, erreicht der Achsantrieb gute Fahrleistungen und hat ein gutmütiges thermisches Verhalten. Wegen seiner Rippen und der Luftführung ist er jedoch unförmig und nur mit großem Aufwand in ein bestehendes Buschassis zu integrieren. Um den Bauraum zu optimieren, wurde in einem weiteren Arbeitsschritt ein flüssigkeitsgekühlter und leistungsgesteigerter Elektromotor (Bild 6) rechnerisch untersucht. Es wurde besonders auf die Wärmeabführung vom Rotor an die im Motor zirkulierende Kühlluft und an deren Rückkühlung geachtet. Die Rückkühlung erfolgt mittels eines Rippenwärmetauschers, der die Wärme an das Kühlmittel (Wasser/Glykol) überträgt. Die Kühlluft wird durch ein auf dem Rotor montiertes Lüfterrad umgewälzt.

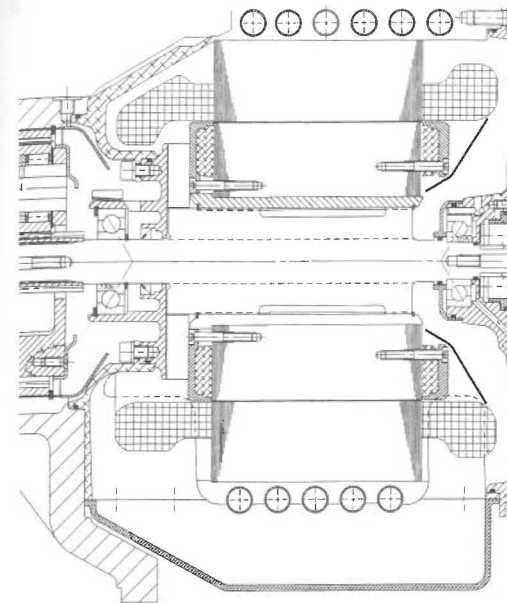


Bild 6: flüssigkeitsgekühlter Elektromotor

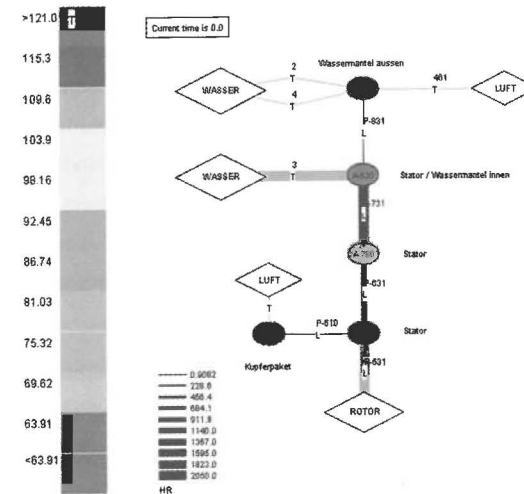


Bild 7: Masseknotenmodell des Stators

Um Wärmenester zu erkennen und Konstruktionsempfehlungen zu erarbeiten, wurde ein Netzwerkwärme-modell bestehend aus vier Teilmodellen aufgebaut. Bild 6 zeigt die Elektromotorskizze zur Modellerstellung. Entsprechend der Skizze wurde das Statormodell (8 Masseknoten) aufgebaut, siehe Bild 7. Darin sind die Masseknoten oval, die Wärmeleitungen mit Strichen zwischen den Masseknoten und die Verbindung zu anderen Wärmeteilmodellen mit Rauten zu sehen. Die Wärmeknoten sind farblich entsprechend der linken Temperaturskala eingefärbt. Das Rotormodell (21 Masseknoten) zeigt Bild 8. Bild 9 zeigt das Luftmodell mit 10 Volumenknoten des Motorinnenraumes. Das Modell ist als Fluidmodell aufgebaut. Der benötigte Luftstrom wird durch einen Ventilator auf dem Rotor erzeugt. Die Luftmenge wird dabei im Simulationsmodell linear abhängig von der Rotordrehzahl angenommen.

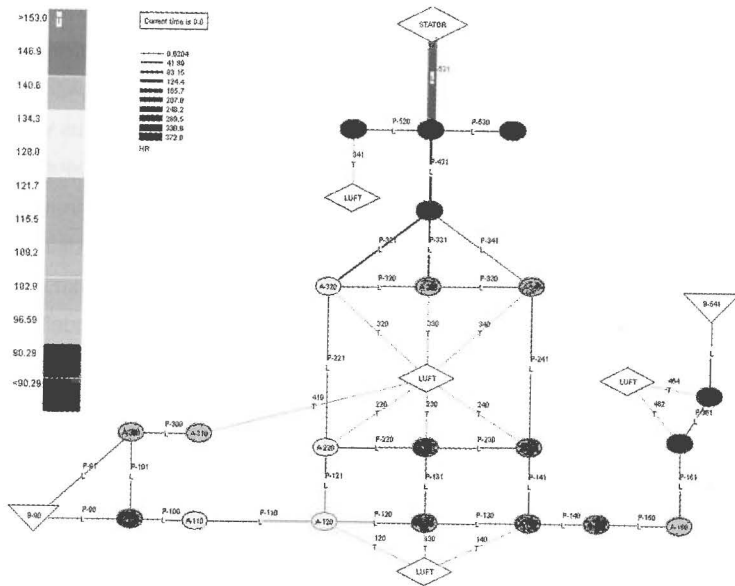


Bild 8: Masseknotenmodell des Rotors

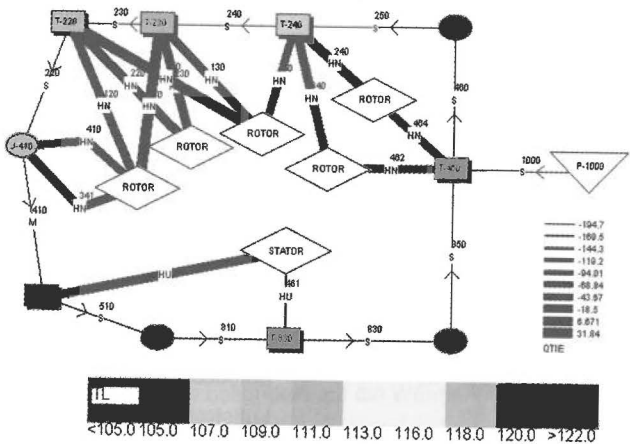


Bild 9: Volumenknotenmodell Motorinnenluft

Das vierte Modell, das einfache Kühlmittelmodell mit 4 Volumenknoten, wird nicht dargestellt.

6.1 Messung

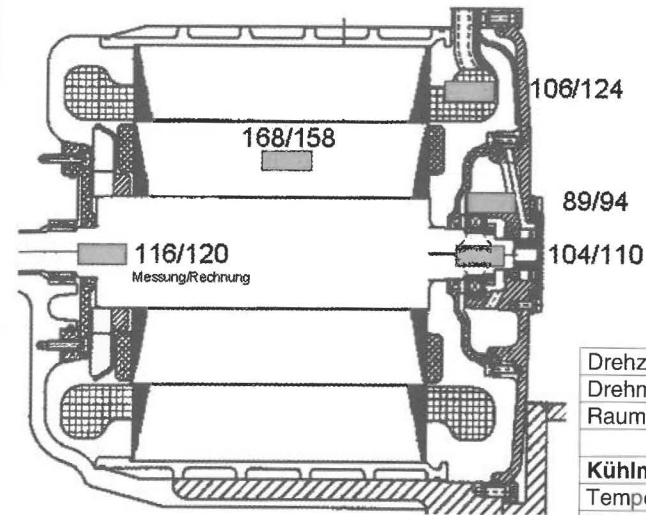


Bild 10: Vergleich Rechnung - Messung

Drehzahl	3750 1/min
Drehmoment	102 Nm
Raumtemperatur	23°C
Kühlmittel	
Temperatur	60°C
Volumenstrom	750 l/min
Druck	2,5 bar

Tabelle 2: Randbedingungen

Der Radnabenmotor wurde auf einem Prüfstand vermessen. In Bild 10 sind 5 Messstellen eingezeichnet. Für die in Tabelle 2 dargestellten Randbedingungen ergeben sich die eingetragenen Messwerte, denen Simulationsergebnisse zugeordnet sind. Erst nachdem das Wärmemodell an den Prüfstand sowie an den geänderten Konstruktionsstand angepasst war, ergab das Simulationsmodell hinreichende Ergebnisse. Die Temperaturen zwischen Messungen und Rechnung liegen bis zu 18K auseinander. Dies lässt sich auf fehlende bzw. unzureichende Daten über die Wärmeverhältnisse (Wärmeentwicklung, Wärmeleitung, Kühlung) im Simulationsmodell des Wickelkopfes zurückführen.

7. Auslegungsvorschlag für ein Fahrzeugkühlsystem

Die Aufgabe war, für einen typischen, kundenneutralen Stadtbus ein stationäres Kühlsystem für stationäre Betriebspunkte auszulegen. Das Kühlsystem, Bild 11, war vorgegeben. Die Komponenten waren: zwei Radnabenantriebe, ein Wechselrichter, eine Pumpe, ca. 30m Rohrleitungen, 20 Krümmer a 45° und ein Kühler. Die

Rechnung sollte einen Auslegungsvorschlag für die in Tabelle 5 angegebenen Randbedingungen für die Pumpenschaltung und die Größe und Anzahl von Kühlern bringen.

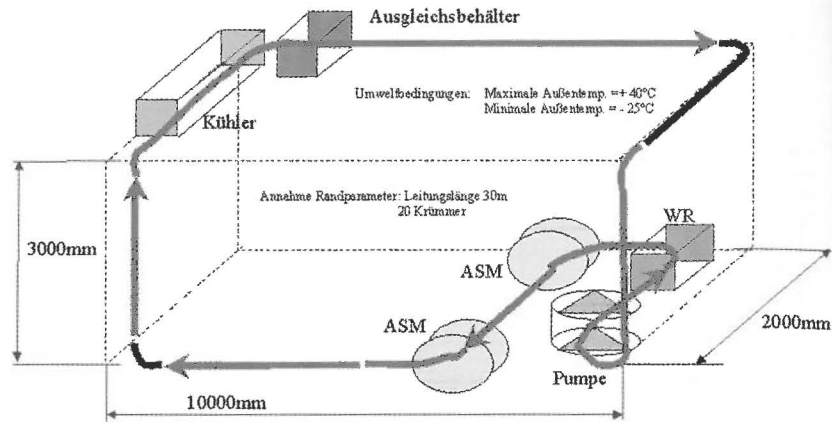


Bild 11: Skizze des Kühlkreislaufes

Max. Kühlmitteltemperatur 80°C
Kühlmittelzusammensetzung 50/50 Wasser/Glykol
Umgebungslufttemperatur 40°C
Rohrdurchmesser 25 mm
Rohrrauigkeit innen 0,1 mm
Rohrradius zu Rohrdurchmesser 2,5 bei Krümmern

Tabelle 3: Randbedingungen und Annahmen

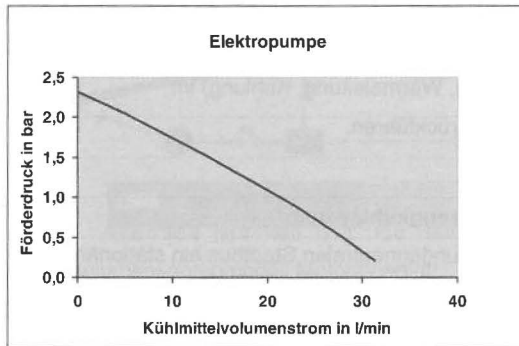


Bild 12: Pumpenkennlinie

Für eine marktgängige Pumpe wurde die Pumpenkennlinie (Bild 12) ermittelt. Die Kühlerwerte wurden dem Programm der Fa. AKG entnommen. Es waren zwei Varianten nötig. Am günstigsten erschien es entweder einen Kühler T6 oder drei Kühler T4 einzusetzen.

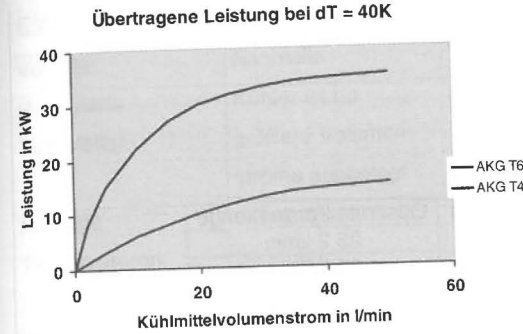


Bild 13: Kühler T4 und T6

Die Kühlerkennlinien zeigt Bild 13. Das erstellte Wärme-fluidmodell zeigt Bild 14. Vier Varianten (siehe Tabelle 4) wurden untersucht. Interessant ist das Ergebnis in Tabelle 5, das den höchsten Volumenstrom und Druck bei zwei parallel verschalteten

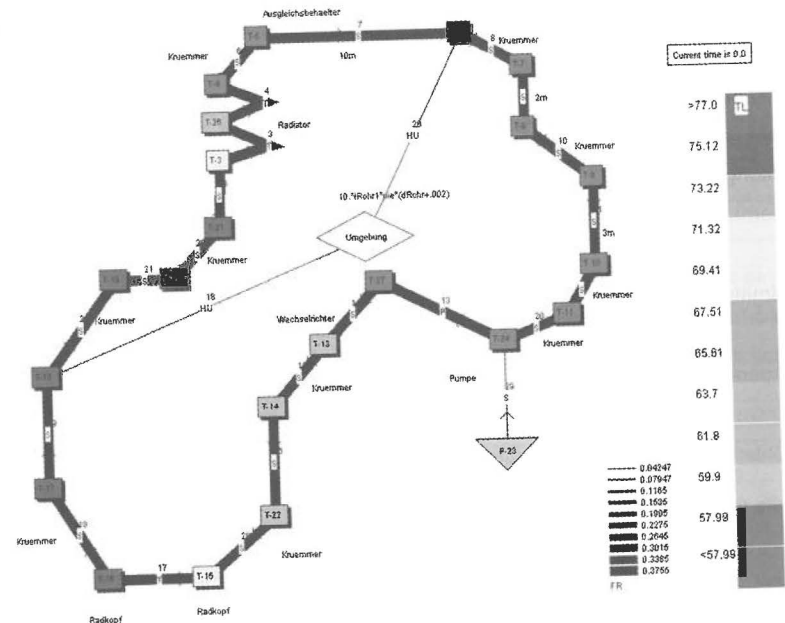


Bild 14: Volumenmodell des Kühlsystems

Pumpen ausweist. Dies lässt sich durch den hohen pumpeninternen Druckverlust erklären und hebt diese Variante in Bezug auf Ausfallsicherheit, Volumenstrom und Druck hervor. Eine Pumpe ist jedoch ausreichend.

Kühler	Pumpe
Ein AKG T6	Eine
Ein AKG T6	Zwei in Reihe
Ein AKG T6	Zwei Parallel
Drei AKG T4	Eine

Tabelle 4: Untersuchte Varianten

Variante	Förderdruck	Gesamte Fördermenge
Eine Pumpe	0,90 bar	25,2 l/min
Zwei Pumpen in Reihe	1,19 bar	29,5 l/min
Zwei Pumpen parallel	1,46 bar	33,0 l/min

Tabelle 5: Ergebnis der Variation mit drei Radiatoren AKG T4

Bei einer stationären Simulation mit drei T4 Kühler und einer Pumpe stellten sich die in Tabelle 6 gelisteten Druckverluste, Volumenströme und Temperaturen ein.

Druckverlust im System	
Radiator	0,18 bar
Wechselrichter	0,38 bar
ASM, Radkopf	0,19 bar
Leitungen	0,15 bar
Gesamtdruckverlust im System	0,90 bar
Kühlmittel-Volumenstrom	25,2 l/min
Temperaturen	
Kühlmitteltemperatur vor Radiator	77 °C
Kühlmitteltemperatur nach Radiator	59 °C

Tabelle 6: stationäres Rechenergebnis

Für das Applikationsgespräch steht nun ein Auslegungsvorschlag bereit. In Tabelle 7 werden zwei Varianten (drei T4 – ein T6) mit jeweils einer Pumpe gegenübergestellt. Die wesentlichsten Unterschiede sind in den Kühlern begründet. Für jeden Kühlerhersteller ergeben sich andere Ausprägungen und die Tabelle 7 muss abgeändert werden. Mit dem in Kapitel 7 beschriebenen Wärmemodell können leicht Änderungen gerechnet und das Kühlsystem optimiert werden.

Ein T6 Kühler		Drei T4 Kühler	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Reduzierte Teilevielfalt	Kühler ist für größere Volumenströme ausgelegt	Optimale Auslegung	Teuer
Niedrige Temperaturen	Kühlerausfall bedeutet Totalausfall	Sehr gut regelbar	Großer Flächen- und Verrohrungsaufwand
Geringer Flächenbedarf	Kühler nur mit 230V lieferbar	Hohe Ausfallsicherheit	

Tabelle 7: Gegenüberstellung von einem und drei Kühlern

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag zeigt, dass mit dem jeweils aktuellen Projektwissen hilfreiche Wärmeberechnungen ausgeführt werden können. Versuche sichern dabei bei einfachen Modellen die Annahmen ab, während bei den umfangreichen Wärme- und Fluidmodellen die Systemfunktion gesamthaft abgeglichen werden kann. Dabei konnte nach dem Abgleich des Wärme- und Fluidmodells ein tiefer Einblick in die Strömungs- und Temperaturverhältnisse gewonnen werden.

Zum Abschluss wurde noch mit einem stationären Kühlsystemwärmemodell ein Auslegungsvorschlag erarbeitet. Bei Bedarf kann dieses Kühlsystemwärmemodell zum instationären Modell erweitert werden. Wird es mit einer Streckensimulation gekoppelt, können zusätzlich detailliert die Fahrdynamik und der Energieverbrauch betrachtet werden.

In Verbindung aller Möglichkeiten sind somit umfangreiche Untersuchungen machbar, wie zum Beispiel:

- Konzeptuntersuchungen
- Auslegen von Komponenten (Hotspots)
- Festlegen von Betriebspunkten, Randbedingungen und Designspezifikationen
- Wirkungsgradoptimierung
- Optimierungen von Energieverbrauch
- Vorausberechnen kritischer Fahrzustände
- Bewerten geänderter Randbedingungen

Literaturverzeichnis

Altvater R.: Wärmehaushalt von Stadtbussen mit Retardern untersucht mit der thermischen Netzwerkmethod, VDI Berichte Nr. 1559, 2000

Boch P.: EE Drive: Der elektrische Radnabenantrieb der ZF, Nahverkehrspraxis, Fachverlag Dr.H.Arnold GmbH, Dortmund, Nr. 1-1998

Bohl Willi: Technische Strömungslehre, Vogel-Buchverlag, Würzburg, 1982

Cullimore B. A., Ring S. G., Johnson D. A.: User's Manual SINDA/FLUINT V4.5, C&R Technologies Inc, 2002

VDI Wärmeatlas, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1977

Miller D. S.: Internal Flow Systems, The Fluid Engineering Centre, Cranfield, Bedford, 1990

Wagner W.: Strömung und Druckverlust, Vogel Verlag, Würzburg, 1997

Wagner W.: Wärmeübertragung, Vogel Verlag, Würzburg, 1998

Akzeptanz von Kraftstoff einsparmaßnahmen **Acceptance of Fuel Reduction Measurements**

Dr.-Ing. **M. Schuckert, H. Enigk, R. Aeverbeck**, EvoBus GmbH, Ulm

Zusammenfassung:

Der Kraftstoffverbrauch von Omnibussen ist von hoher Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit von Verkehrsbetrieben. Technische Möglichkeiten zur Verbesserung des Kraftstoffverbrauches werden zunehmend geringer, weshalb der Fahrer und dessen Einflußmöglichkeiten auf den Kraftstoffverbrauch in den Vordergrund geraten. Durch Analyse der Fahrgewohnheiten bei Fahrertrainings und Fahrerbefragungen wurde die Erkenntnis gewonnen, daß eine erhebliche dauerhafte Verbrauchsreduktion erzielt werden kann, wenn die Fahrer periodisch geschult und über Anreizsysteme motiviert werden.

Summary:

Fuel consumption of busses plays an important role in the life cycle considerations of transport companies. As the influence of technical measurements on drive train level for a significant fuel reduction becomes smaller and smaller, the bus driver and his driving behaviour will become of greater importance. EvoBus and DaimlerChrysler Research have studied the driving characteristics and the knowledge base of the driver and came to the conclusion, that trained driver are able to reduce the fuel consumption by up to 7 % even on a long term perspective. In order to keep this result it is necessary to train the driver continuously and to motivate him by suitable incentives.

1. Einleitung

Seit vielen Jahren bildet die Optimierung des Kraftstoffverbrauches von Omnibussen einen Schwerpunkt in den Entwicklungstätigkeiten. Erweiterte Komfortansprüche wie z.B. die Verwendung leistungsfähiger Klimaaanlagen, verschärfte Abgasvorschriften, erhöhte Craschanforderungen wirken den technischen Maßnahmen zur Verbrauchsreduzierung entgegen.