

Berichtskontrollblatt

Schlussbericht

(Förderkennzeichen 03X3556)

TEKOCar - Entwicklung eines thermogeneratorischen Systems auf Basis von kombinierten Silizid/Tellurid-Modulen für Anwendungen in der Verkehrstechnik

Verfasser: Michael Miersch
Datum: 03.08.2015
Veröffentlicht: „geplant“
Seitenanzahl: 34
Anzahl Literatur: keine
Anzahl Bilder: 16
Anzahl Tabellen: keine

Tenneco GmbH
Luitpoldstraße 83
67480 Edenkoben
06323 – 47 1489
mmiersch@tenneco.com

ISBN: „geplant“



TEKoCar
Abschlussbericht
2012-2015
Beitrag Tenneco
Förderkennzeichen 03X3556

Verfasser: Michael Miersch

Datum: 03.08.2015

Tenneco GmbH
Luitpoldstraße 83
67480 Edenkoben
06323 – 47 1489
mmiersch@tenneco.com

Inhalt

1	Aufgabenstellung und Ausgangssituation	5
2	Planung des Projektes.....	6
2.1	Realisierter Projektverlauf für Tenneco	9
2.1.1	Zu AP1: Lastenhefterstellung	9
2.1.2	Zu AP5: Entwicklung peripherer Systemkomponenten für Hochtemperatur-Thermoelektrika	9
2.1.3	Zu AP8: Thermisches Management	10
2.1.4	zu AP11: Demonstratorendesign	10
2.1.5	zu AP12: Demonstratorentests.....	10
2.1.6	zu AP14: Studie zu optimiertem Design	11
3	Auswahl des Zielfahrzeuges.....	11
3.1	Opel Insignia 2,0l turbo charged	11
3.2	Skoda Yeti 1,4l turbo charged	12
4	Mobiler Kühlkreislauf (MKL)	12
4.1	Prüfstand.....	12
4.2	Kühlkreislaufkonzept	13
4.3	DasTemperiergerät	15
4.4	Inbetriebnahme	18
4.5	Der Versuch auf dem Rollenprüfstand	19
4.6	Auswertung	19
4.7	Validierung des mobilen Kühlkreislaufes	20
4.7.1	Ausgangssituation	20
4.7.2	Das Ziel der Regelgenauigkeit	21
4.7.3	Toleranzgrenzen	21
4.7.4	Ergebnis	22
5	Das TEG-Bypass Design	23
6	Charakterisierung der Y-Klappe	25
6.1	Y-Klappe.....	26
6.2	Aktuator	26

6.3	Versuchsaufbau	27
6.4	Massenstromerfassung	27
6.5	Drehmomentprüfstand	28
6.6	Gesamtaufbau	28
6.7	Auswertung	28
6.7.1	Massenstromaufteilung.....	29
6.7.2	Drehmoment	31
6.7.3	Anwendung der Umrechnung.....	32
7	Ausblick	33

1 Aufgabenstellung und Ausgangssituation

Es sollte ein thermoelektrischer Generator auf der Basis von kombinierten Silizid / Tellurid – Modulen für Anwendungen in der Verkehrstechnik entwickelt werden. Dieses Vorhaben wurde unter dem Namen TEKoCar mit dem Förderkennzeichen 03X3556 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie („BMBF“) geführt und gefördert.

Ziel des Vorhabens ist es Demonstratoren eines thermoelektrischen Generatorsystems (im Folgenden TEG) mit folgenden Eigenschaften darzustellen:

- Temperatur 500°C (Gastemperatur auf der heißen Seite)
- Zyklusfestigkeit 25-500°C >500
- Fluidische Integration auf der Heiß- und Kaltseite
- Wärmetauscherdesign mit Druckverlust <50mbar
- Systemeffizienz >5%

Innerhalb dieses Projektes sollten die Kompetenzen Projektpartner vernetzt werden und notwendige Entwicklungen anhand der Wertschöpfungskette durchgeführt werden. Die Projektziele waren auf die Abgasenergienutzung im Automobil konzentriert.

Dies war die Basis für eine Entwicklung gemeinsam mit der Automobilindustrie, um z.B. mit Hilfe des TEGs die CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Es galt diverse technische Herausforderungen zu lösen wie z.B. die Temperaturbeständigkeit größer 500°C der TE-Materialien, Aufbau- und Verbindungstechnik sowie das Gesamtsystem mit Bypass und deren Ventile inkl. der geeigneten Programmierung.

Es wurde als Werkstoffbasis die Materialien aus dem BMBF-Projekt „Entwicklung thermoelektrischer Hochtemperaturmodule auf Basis der Silizide von Magnesium und Mangan mit neuen produktionstauglichen Verfahren - MAGMAN“ herangezogen. In diesem wurden thermoelektrische Werkstoffe für den Hochtemperaturbereich auf Basis von Magnesium- und Mangansilizid entwickelt, sowie die Aufbau- und Verbindungstechnik zur Herstellung von „thermoelektrischen Batterien“ erprobt.

In dem Projekt „TEKoCar“ sollten die Materialien weiter entwickelt werden und mit Modulen auf der Basis von aktuellen Raumtemperaturwerkstoffen zu Kaskaden

kombiniert werden, so dass ein großer Temperaturgradient effektiv genutzt werden kann. Der Beweis sollte so herbeigeführt werden, indem man ein Kfz-Abgassystem auslegt und die Anbindungstechnik der Module auf Serientauglichkeitsniveau im Abgassystem integriert sind.

Die Auslegung des Thermoelektrischen Systems sollte auf der Basis der Abgasnorm Euro 6 erfolgen welche zur Folge hat, das verschiedene Potenziale an verschiedenen Einbauorten vorliegen.

Somit war die Umgebung des Projektes definiert.

2 Planung des Projektes

AP1 – Erstellung Lastenheft (Alle)

Tenneco kann bei der Lastenhefterstellung durch Definition der folgenden allgemeinen Anforderungen beitragen:

1. Mechanische und physikalische Anforderungen: Vibrationen, Straßenanregung, Motoranregung, Definition der Belastungskollektive, Einsatztemperatur, äußere Anforderungen
2. Abmessungen, Gewichtsziel
3. Werkstoffanforderungen
4. Bauraum
5. Montage und Demontage
6. Akustisches Verhalten
7. Anforderungen an Korrosionsschutz, chemische Beständigkeit, sowie Umgebungsbedingungen im Einsatz (Spritzwasser, Steinschlag, Salz, Kondensat, Verbrennungsrückstände, usw.)
8. Definition der Lebensdauer
9. Werkstoffgebote/-verbote
10. Gesetzliche Auflagen

Das Definieren des Lastenheftes ist ein Prozess bei dem alle beteiligten Konsortiumspartner gemeinsam mitwirken werden. Die oben aufgeführten Punkte müssen mit allen projektverantwortlichen Partnern diskutiert und ggf. ergänzt/geändert werden.

AP5 – Entwicklung peripherer Systemkomponenten für Hochtemperatur-Thermoelektrika (Tenneco, Behr)

Zu diesem Arbeitspaket gehört die Entwicklung eines Bypass-Stranges mit elektrisch betätigter Klappenvorrichtung. Zum jetzigen Zeitpunkt kann auf ein solches System nicht verzichtet werden, da eine Temperaturregelung auf der Heißseite zur optimalen Nutzung und zum Schutz des thermoelektrischen Generators notwendig ist. Die Klappenvorrichtung soll eine stufenlose und somit betriebspunktabhängige Aufteilung des Abgasstromes zwischen thermoelektrischem Generator und Bypass ermöglichen. Dies gewährleistet einen Betrieb mit bestmöglichem Wirkungsgrad.

Teil der Entwicklung ist auch die Durchführung von begleitenden Funktions- und Betriebsfestigkeitsuntersuchungen für die Klappenvorrichtung:

1. Lagertests (Werkstoffe für Lagerung der Klappe)
2. Temperaturmessungen
3. Interne und externe Leckagemessung
4. Akustische Charakterisierung
5. Vibrationsanalyse und Resonanzdauerlauf
6. Umweltsimulation (Steinschlag, Staubtest, Salzsprühnebel, feuchte Wärme)
7. Dauerschalttest
8. Gegendruckanalyse

Tenneco wird im Rahmen dieses Arbeitspaketes für das Klappensystem auch eine Patentrecherche durchführen.

AP8 – Thermisches Management (Alle)

Tenneco und die anderen Projektpartner werden in diesem Arbeitspaket verschiedene Einbauorte untersuchen und eine geeignete Position auswählen.

Tennecos weitere Aufgabe in diesem Arbeitspaket besteht in der Bereitstellung der Abgastemperaturen und der Massenströme in einem zu definierenden Fahrzyklus.

Diese Daten werden dann von den Projektpartnern für Simulationen und im weiteren Projektverlauf auch für Komponententest verwendet. Mit Hilfe der Messergebnisse können die numerischen Simulationen validiert und die Auslegung eines TEGs vorgenommen werden.

AP11 – Demonstratordesign (Alle)

Zur Ermittlung einer optimalen geometrischen Modulgestaltung (z.B. Form, Moduldicke, Flächenverhältnisse, Wärmetauscheranbindung etc.) wird Tenneco mit Untersuchungen zur Positionierung und Integration in den Abgasstrang beitragen.

AP12 – Demonstratortest (Tenneco, IFAM, IPM)

Tenneco wird in diesem Arbeitspaket Untersuchungen zur Funktions- und Betriebsfestigkeit, sowie eine akustische Charakterisierung durchführen. Folgende Tests werden empfohlen:

1. Temperaturmessungen
2. Interne und externe Leckagemessung
3. Akustische Charakterisierung
4. Vibrationsanalyse und Resonanzdauerlauf
5. Umweltsimulation (Steinschlag, Staubtest, Salzsprühnebel, feuchte Wärme)
6. Dauerschalttest
7. Gegendruckanalyse

Es ist zu erwarten, dass die angegebene Testübersicht im Laufe des Projektes noch ergänzt bzw. geändert wird.

Eine Post-Mortem-Analyse aller Einzelkomponenten findet nach Abschluss der Testreihen statt.

AP13 – Integration in die Abgasanlage (Tenneco)

In diesem Arbeitspaket sollen die einzelnen Komponenten, wie thermoelektrische Engine, elektrisches Ventil, Bypass, Verrohrung und thermisches Ausgleichselement (Flex) in das Abgassystem integriert werden. Dazu soll eine CAD Untersuchung durchgeführt werden, die z.B. die Bauraumverhältnisse in einem möglichen Fahrzeug berücksichtigt. Die CAD-Daten sollen außerdem dazu dienen, Vorhersagen zur Betriebsfestigkeit mittels FEM zu treffen und das System frühzeitig zu optimieren.

AP14 – Studie zu optimiertem Design (Alle)

Auf der Basis der Ergebnisse der vorausgehenden Arbeitspakete sollen Verbesserungspotentiale aufgezeigt und ein optimiertes Design des thermoelektrischen Generators entwickelt werden.

2.1 Realisierter Projektverlauf für Tenneco

2.1.1 Zu AP1: Lastenhefterstellung

Das Lastenheft konnte zu keinem Zeitpunkt vollständig beendet werden, da die Ergebnisse auf der Materialentwicklungsseite nicht die notwendigen Werte zeigten. Die Frage, ob es innerhalb des Projektes tatsächlich möglich ist, den TEG in ein Auto zu integrieren, wurde deshalb immer wieder neu gestellt und die notwendige Antwort nach hinten verschoben. Zu viele andere „Baustellen“, wie die zu geringen Festigkeitswerte und deren Charakterisierung bei verschiedenen Temperaturen als auch die Anbindung der Schenkel auf der Keramik zu einem Modul waren die grundlegenden Herausforderungen an denen man gearbeitet hat. Zudem war lange ausständig, ab welcher Temperatur die Oxidation der TE-Materialien startet und wie man die Materialien gegen Oxidation schützt. Auch die für die TE-Materialien maximal verträgliche Temperatur konnte erst spät im Projekt ermittelt werden. Dies machte es immer wieder schwierig den TEG auf ein spezielles Fahrzeug auszulegen da die Abgastemperaturen fahrzeugspezifisch unterschiedlich sind. Letztlich wurden zwei Fahrzeuge im NEFZ (*Neu europäischer Fahrzyklus*) gemessen, um eine möglichst breite Bandbreite an Werten, vom Kleinwagen bis zum Mittelklassewagen, zwecks Simulation zur Verfügung stehen zu haben.

2.1.2 Zu AP5: Entwicklung peripherer Systemkomponenten für Hochtemperatur-Thermoelektrika

Aufgrund der zeitlichen Verschiebung des TEKoCar Projektes und die dadurch auch veränderte Marktsituation wurde entschieden, keine neue Klappe für das Projekt zu entwickeln wie es zum Anfang des Projektes angedacht war. Stattdessen wurde eine Klappe zugekauft.

Die Notwendigkeit lässt sich wie folgt erklären:

- ⇒ Projekt mit mehr als einem Jahr Verzögerung gestartet
- ⇒ Tenneco hat zwischenzeitlich Klappe entwickelt (Kundenauftrag)
- ⇒ Y-Klappe am Markt verfügbar

- ⇒ Somit haben sich Rahmenbedingungen und damit auch die Grundlage für eine Klappenentwicklung geändert
- ⇒ Ursprünglicher Plan aus Tenneco-Sicht nicht mehr sinnvoll bzw. nicht mehr gegenüber BMBF vertretbar
- ⇒ Schlussfolgerung: Reduzierung der Umfänge; Verwendung einer am Markt verfügbaren Y-Klappe

2.1.3 Zu AP8: Thermisches Management

Diese konnten im vollen Umfang durchgeführt werden. Das später gezeigte TEG-Design wurde für den Bauraum des Skoda Yeti ausgelegt.

2.1.4 zu AP11: Demonstratordesign

Auch dieser Punkt konnte vollständig bearbeitet werden. Es wurden verschiedene Temperatur-Messstellen im Fahrzeug während der Zyklusfahrt gemessen. Anhand dieser Messwerte konnte Mahle-Behr die Beste Position ermitteln. Tenneco hat das Design entsprechend angepasst und die Abstände im Bauraum geprüft.

2.1.5 zu AP12: Demonstratortests

Zu Demonstratortests im Fahrzeug bei Tenneco auf der Fahrzeugrolle ist es nicht gekommen. Es konnte kein TEG in der Größe aufgebaut werden der für die Massenströme des Skoda Yeti geeignet war, aufgrund der geringen Anzahl an Schenkel die zur Verfügung standen. Die Ursache dafür lag darin, dass die verfügbaren TE-Materialien die vorlagen, die Produktionsmöglichkeiten des Fraunhofer ifam komplett ausgelastet haben und der Großteil der produzierten Schenkel für Kontaktierungsversuche und zur Ermittlung der Festigkeitswerte genommen wurden. Dies hatte zur Folge, dass am Ende zu wenig Schenkel zur Verfügung standen die man für eine Fahrzeugintegration gebraucht hätte.

Es wurde ein kleiner TEG gebaut der auf dem Prüfstand erprobt werden sollte. Mahle-Behr konnte mit einem vorhandenen Prüfstand die kleinen Massenströme erzeugen und somit den TEG testen. Alle weiteren Tests die in diesem Arbeitspaket

erledigt werden sollten, konnten nicht durchgeführt werden, da es sich um einen reinen Prüfstands-TEG gehandelt hat. Eine Erprobung hinsichtlich der Durability oder Thermoschock, hätte keine verwertbaren Ergebnisse für einen der Projektpartner erbracht, da das Design weit weg von einem Design einer Fahrzeugapplikation war.

2.1.6 zu AP14: Studie zu optimiertem Design

Da das Projekt im Januar 2015 zu Ende ging und der TEG zu diesem Zeitpunkt noch nicht erprobt war, wurden nach dem Ablauf der Projektlaufzeit keine weiteren Aktivitäten zu diesem Arbeitspaket gestartet.

3 Auswahl des Zielfahrzeuges

Es sollte ein Fahrzeug gefunden werden, das einem modernen Stand der Technik entspricht und gleichzeitig dem TEG genügend Abwärme zur Verfügung stellt. Zunächst wurde eine Skoda Yeti mit 1,4l Turbo-Motor und 90kW gemessen um das Potenzial eines kleineren Wagens zu ermitteln. Die Abgastemperaturen sind jedoch nicht so hoch, als dass ein hoher Power-Output zu erwarten gewesen wäre. Es wurde aus diesem Grund ein Opel Insignia 2,0l Turbo-Motor gemessen der mit 160kW eine deutlich höhere Abgastemperatur vorweisen kann. Es wurde somit die Möglichkeit geschaffen, einen „kleinen“ mit einem „großen“ Motor zu vergleichen um ein besseres Verständnis zu entwickeln, wo die größeren Potenziale liegen.

3.1 Opel Insignia 2,0l turbo charged

Die Maximale Temperatur des Insignia während des NEFZ-Zyklus beträgt 711°C.

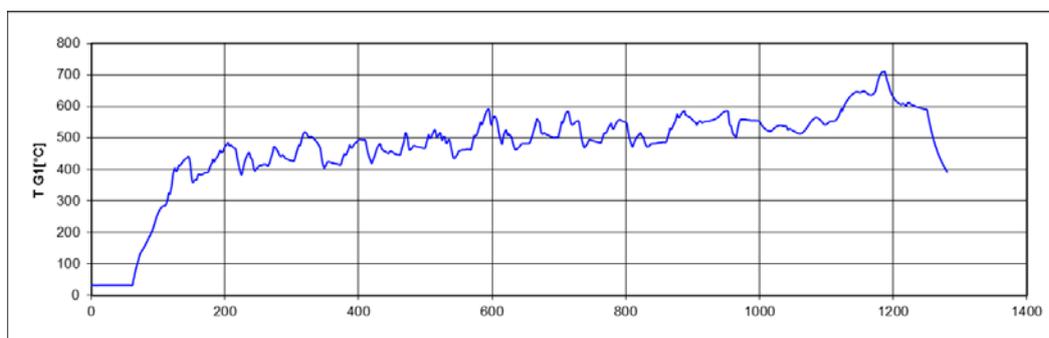


Bild1: Temperatur-Zeitverlauf Opel Insignia

3.2 Skoda Yeti 1,4l turbo charged

Beim Skoda Yeti wurde als höchste Temperatur während des NEFZ ca. 600°C festgehalten. Die zur Verfügung stehende Energie liegt über den gesamten Verlauf unterhalb der Energie des Opel Insignia.

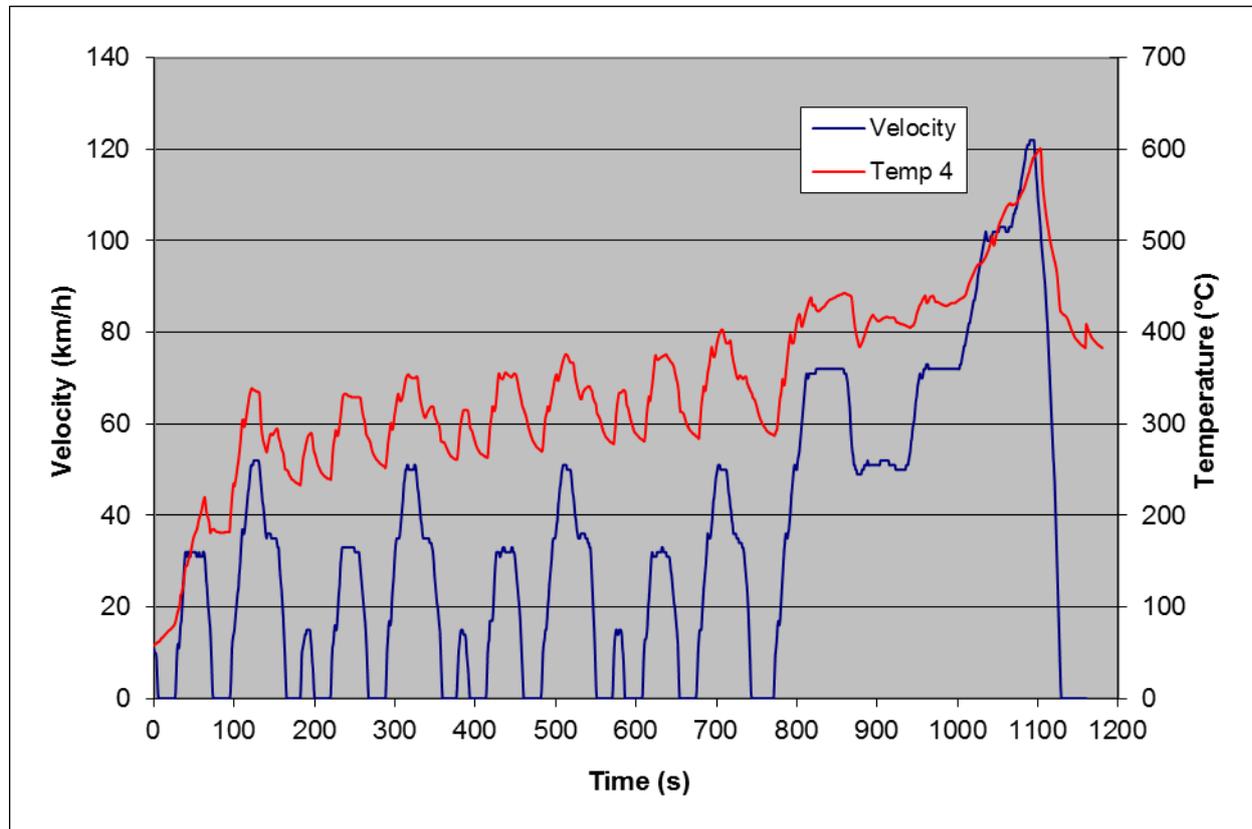


Bild2: Temperatur-Zeitverlauf Skoda Yeti

4 Mobiler Kühlkreislauf (MKL)

4.1 Prüfstand

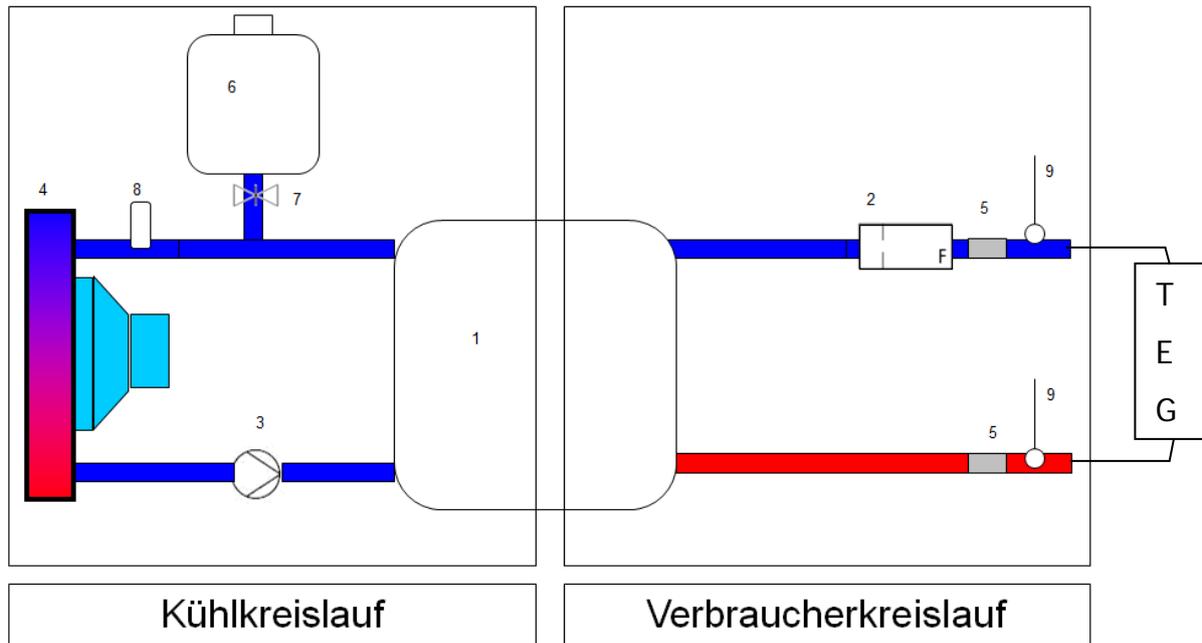
Der mobile Kühlkreislauf (nachfolgend MKL genannt) soll während einer TEG Validierung die „kalte Seite“ des TEG darstellen. Die Eigenschaften sollen dem eines typischen Fahrzeugkühlkreislaufes entsprechen. Zudem muss es möglich sein, dass der MKL am Prüfstand zum Einsatz kommt um einen TEG betreiben zu können ohne dass es notwendig ist den TEG in den Fahrzeugkühlkreislauf (FKL genannt) zu integrieren. Der Volumenstrom des MKL muss regelbar sein. Die Temperatur muss vor dem Eingang und nach Ausgang des TEG gemessen werden können. Alle

Messwerte müssen direkt am MKL und in der Messwarte abgelesen werden können. Weiterhin ist es notwendig den MKL von der Messwarte aus zu bedienen d.h., alle Parameter müssen von dort aus regelbar sein.

Die vorliegenden Messwerte müssen von der Messwarte aus aufgezeichnet werden können.

4.2 Kühlkreislaufkonzept

Das Kreislaufkonzept basiert auf einem Temperiergerät der Firma Regloplas. Temperiergeräte werden zur Kühlung und Temperierung von Werkzeugen in der Kunststoffindustrie verwendet. Normalerweise wird das Temperiergerät an eine Wasserversorgung angeschlossen. Um den Kühlkreislauf jedoch mobil und flexibel zu gestalten, wird dem Temperiergerät ein weiterer Kreislauf angeschlossen. Dieser Kreislauf besteht lediglich aus einer Pumpe und einem Kühler mit integriertem Lüfter sowie einem Entlüftungsventil und einem Tank mit Kugelhahn. Der Fühler S1 im Tank dient zur Füllstandskontrolle. Der Expansionsvolumenausgleich findet im Auffangbehälter statt. Ebenso dient er als „Tank“ beim Leersaugen des Verbrauchers. Der mobile Kühlkreislauf hat also die Anforderung, die kalte Seite des TEGs darzustellen und einen normalen Wasseranschluss zu ersetzen um mobil zu sein. Weiterhin besteht die Aufgabe einer Temperaturregelung zwischen 80-110°C, welche durch das Temperiergerät übernommen wird. Eine Volumenstromregelung wird durch eine frequenzgesteuerte Pumpe im Temperiergerät und einem Volumenstromsensor durchgeführt. Die Temperatursensoren dienen zur unmittelbaren Temperaturmessung vor und nach dem TEG. Siehe nachfolgendes Bild 1.



N

Bild 3: Schematische Darstellung der Kreisläufe

4.3 Das Temperiergerät

Das Temperiergerät der Firma Regloplas hat folgende technische Daten:

Temperiergerät-Typ	P140S
Max. Vorlauftemperatur	140 °C
Wärmeträger/Medium	
Füllmenge	1.0 l
Heizleistung	8 kW
Heizschaltgerät	SSR-Relais
Kühlleistung	33 kW (SK)
bei Vorlauftemperatur	130 °C
Pumpen-Typ	SM22
Motorleistung (Pumpe)	0.5 kW
Max. Fördermenge	40 l/min
Max. Förderdruck	5.5 bar
Systemdruck	10 bar
Vorlaufdruck	max. 16 bar
Regelung	
Messart (Standard)	Pt100
Steuerspannung	230 V, 50/60 Hz
Anschluss-Spannungen	200-600 V 50/60 Hz
Gesamtleistung bei 400 V	8.5 kW
Anschlüsse Vorlauf/Rücklauf (Standard)	G 1/2"
Anschlüsse Kühlwassernetz (Standard)	G 1/2"
Schutzart	IP54
Abmessungen B/H/T	236/589/812 mm
Gewicht	ca. 52 kg
Farbe	RAL 9006/7016
Umgebungstemperatur	max. 40°C
Dauerschalldruckpegel	< 70 dB(A)

Bild 4: Technische Daten Temperiergerät P140S
(Quelle Betriebsanleitung Temperiergerät P140S aic-Regloplas GmbH)

Für die funktionale Erläuterung ist nachfolgend ein Prinzip Schema des inneren Aufbaus des Temperiergeräts

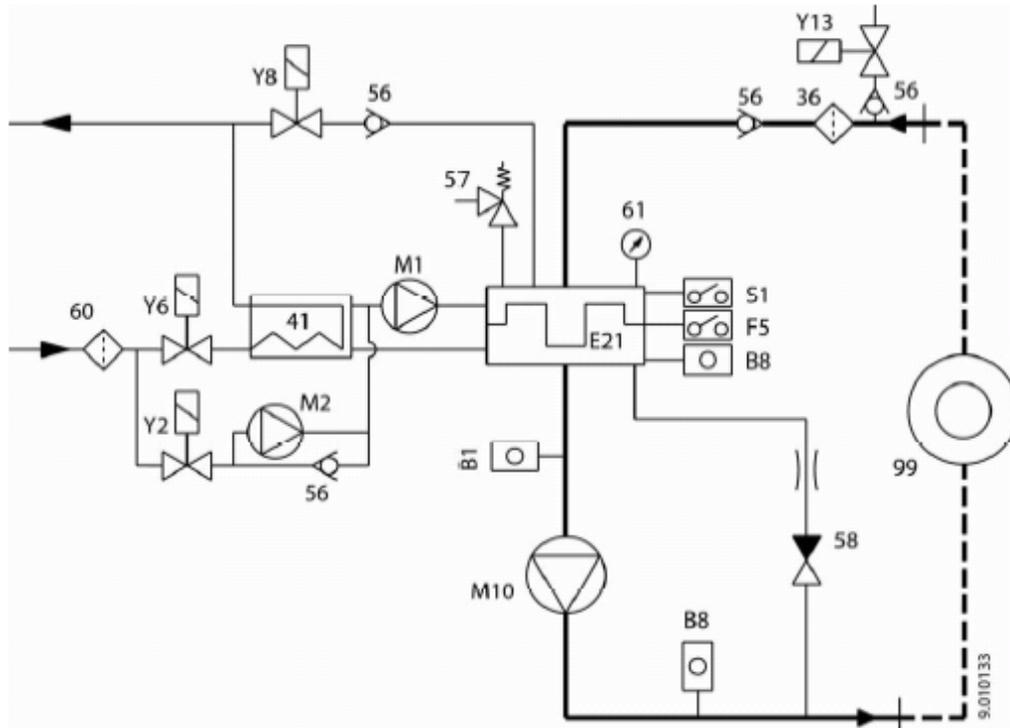


Bild 5: Prinzip Schema Temperiergerät P140S
(Quelle Betriebsanleitung Temperiergerät P140S aic-Regloplas GmbH)

Nachfolgend die Legende für das Prinzip Schema des Temperiergerätes:

Pos.	Bezeichnung	Pos.	Bezeichnung
36	Filter Hauptkreislauf	E21	Heizung
41	Kühler	F5	Sicherheitsthermostat
56	Rückschlagventil	M1	Kühlpumpe (SK-Kühler)
57	Sicherheitsventil	M2	Füllpumpe
58	Bypass	M10	Pumpe
60	Filter Kühlkreislauf	S1	Niveauekontrolle
61	Manometer	Y2	Magnetventil autom. Wassernachfüllung
99	Verbraucher	Y6	Magnetventil Kühlung
B1	Temperaturfühler intern	Y8	Magnetventil Druckentlastung
B8	Drucksensor	Y13	Magnetventil Absaugung

Bild 6: Legende Prinzip Schema Temperiergerät P140S
(Quelle Betriebsanleitung Temperiergerät P140S aic-Regloplas GmbH)

Das Temperiergerät dient zur Temperierung des Mediums Wasser-Glykol-Gemisch. In einem Tank mit einem Volumen von einem Liter befindet sich die Heizung E 21.

Durch diese kann das Medium erhitzt werden. Gekühlt wird das Medium durch den Kühler 41, der wie ein Wärmetauscher funktioniert. Üblicherweise wird das Temperiergerät an eine Wasserleitung angeschlossen. Das Frischwasser fließt dann durch den Filter 60 im Kühlkreislauf in das Temperiergerät. Das Magnetventil Y6 öffnet, wenn das Medium aus dem Verbraucherkreislauf gekühlt werden soll. Die Kühlpumpe M1 fördert das Medium vom Verbraucherkreislauf zwischen Tank mit Heizung E21 und Kühler 41 hin und her und sorgt somit für eine Kühlung des Mediums im Verbraucherkreislauf. Das Magnetventil zur automatischen Wassernachfüllung Y2 öffnet dann, wenn im Verbraucherkreislauf zu wenig Medium vorhanden ist, was über die Niveauekontrolle S1 am Tank kontrolliert wird. Durch die Füllpumpe M2 wird bei geöffnetem Magnetventil Y2 das Wasser des Kühlkreislaufes, dem Medium des Verbraucherkreislaufes zugemischt. Der Verbraucher 99 ist in unserem Fall der TEG. Die Pumpe M10 ist die Pumpe für den Verbraucherkreislauf. Mit einem Volumenstromsensor, welcher zwischen Temperiergerät und Verbraucher angeschlossen wird und einem Frequenzumrichter für die Pumpe M10, welcher im Temperiergerät integriert ist, lässt sich der Volumenstrom regeln. Durch die beiden Drucksensoren B8 ist über eine Druckdifferenz und einer unzulässigen Abweichung eine Leckage erkennbar. Der Drucksensor B8 nach der Pumpe dient bei diesem Konzept zur Druckmessung vor dem TEG. Durch den Temperaturfühler B1 wird die Temperatur für das Temperiergerät geregelt. Durch das Magnetventil Y8 wird bei unzulässigem Druck im System, welcher sich einstellen lässt, das Medium aus dem Verbraucherkreislauf dem Kühlabwasser zugemischt. Außerdem besteht die Möglichkeit, durch Umkehrung der Drehrichtung der Pumpe M10, den Verbraucher leer zu saugen. Beim Absaugen mischt das Magnetventil Y13 Luft in den Kreislauf, um einen Unterdruck zu verhindern. Wenn vor dem Verbraucher ein Kugelhahn platziert wird und dieser im Betrieb geschlossen ist, öffnet der Bypass 58, um einen hohen Druckaufbau am Kugelhahn zu vermeiden. Der Systemdruck im Verbraucherkreislauf lässt sich durch das Temperiergerät einstellen. Somit kann durch Ermittlung des Pumpendruckes bei eingestelltem Volumenstrom und einstellen des Systemdruckes der gewünschte Druck im System eingestellt werden.

4.4 Inbetriebnahme

Der mobile Kühlkreislauf wurde aufgebaut und getestet. Es wurden folgende Komponenten zu einem System zusammengestellt:

- Mobiler Wagen
- Kühler mit Gebläse (30kW Kühlleistung)
- Pumpe zur Zirkulation über den Kühler
- Ausgleichsbehälter mit Überdruckschutz (max. 1,5 bar)
 - Füllstandswächter
 - Signallampe
- Anschlüsse für den Prüfling
- Not-Aus
- Schaltschrank mit integrierter Temperaturregelung der Kühlerseite

Zur Validierung des mobilen Kühlkreislaufes begannen erste Prüfstandsläufe auf einer Abgasrolle. Der Versuchsaufbau gliederte sich wie folgt: Das Temperiergerät ist das Herzstück des Prüfstandes. Es ermöglicht Wasser auf eine bestimmte Temperatur zu erwärmen bzw. abzukühlen. Um dieser Funktion gerecht werden zu können, besitzt das Gerät zwei verschiedene interne Wasserkreisläufe. Einen temperierten Kreislauf und einen Frischwasserkreislauf, der für die Funktion „Kühlen“ notwendig ist. Der temperierte Kreislauf ist mit dem Fahrzeug verbunden und stellt die gewünschte Temperatur des Wassers im Wärmetauscher sicher. Das Testfahrzeug war ein Skoda Yeti 1,4 TSI. In dieses Fahrzeug wurde ein Wärmetauscher als TEG Ersatz in die Abgasanlage implementiert, ebenfalls ein Sensor im Wasserkreislauf zum Messen der Kühlwassertemperatur. Der Wärmetauscher wird mit dem Wasser des mobilen Kühlkreislaufes versorgt. Die entsprechende Temperatur die das durchströmende Wasser haben soll, wird vom Temperiergerät geregelt. Diese Regelung ist eine Sollwert-Regelung. Das Thermoelement, welches sich im Rücklauf des Wasserkühlkreislaufes befindet, gibt dem Temperiergerät den Sollwert vor und der mobile Kühlkreislauf folgt den Vorgabewerten des Autos. Diese Regelung ermöglicht eine realitätsnahe Versuchsdurchführung auf dem Prüfstand.

4.5 Der Versuch auf dem Rollenprüfstand

Das Auto, welches sich auf der Abgasrolle befindet, fährt einen „NEFZ – Fahrzyklus“. Die Ausgangssituation beschreibt einen kalten Motor / Kühlkreislauf, eine Umgebungstemperatur von ca. 23°C und einen kalten mobilen Kühlkreislauf. Das Fahrzeug startet mit Beginn des Fahrzyklus, ebenso wie der mobile Kühlkreislauf. Ein vollständiger NEFZ-Zyklus wird nachgefahren, dies bedeutet, dass das Temperiergerät dem Erwärmen des Kühlwassers Folge leistet. Der Wärmetauscher wird während des Tests mit heißem Abgas durchströmt, gleichzeitig pumpt der mobile Kühlkreislauf das temperierte Wasser ebenfalls durch den Wärmetauscher. Innerhalb des Prüflaufes werden die Wasservorlauf- und die Wasserrücklauf-temperatur, der Sollwert, der Pumpendruck, der Volumenstrom und Abgastemperatur mitgeschrieben, um spätere Auswertungen durchführen zu können.

4.6 Auswertung

Die nachfolgende Bild 5 zeigt den Verlauf der Kühlwassertemperaturen. Der blaue Graph stellt den „Sollwert“, welcher im Fahrzeug direkt abgegriffen wird, dar. Der „Istwert-Verlauf“ wird durch den roten Graphen dargestellt. Auf der X-Achse ist die Zeit abgebildet und auf der Y-Achse die Temperatur. Die Abweichung zwischen „Soll- und Istwert“ ist akzeptabel gering, jedoch hat das Gerät noch unangetastetes Verbesserungspotential, durch Einstellmöglichkeiten der PID-Regelung und Taktzeiten.

Einen weiteren Einfluss auf die Regelgenauigkeit, hat die eingebrachte Wärmemenge über den Wärmetauscher in das Kühlmedium. Wärmetauscher, oder auch ein TEG, mit niedrigem Wärmeübergang lässt einen höheren Wärmefluss zu und muss dann evtl. über den PID-Regler angepasst werden.

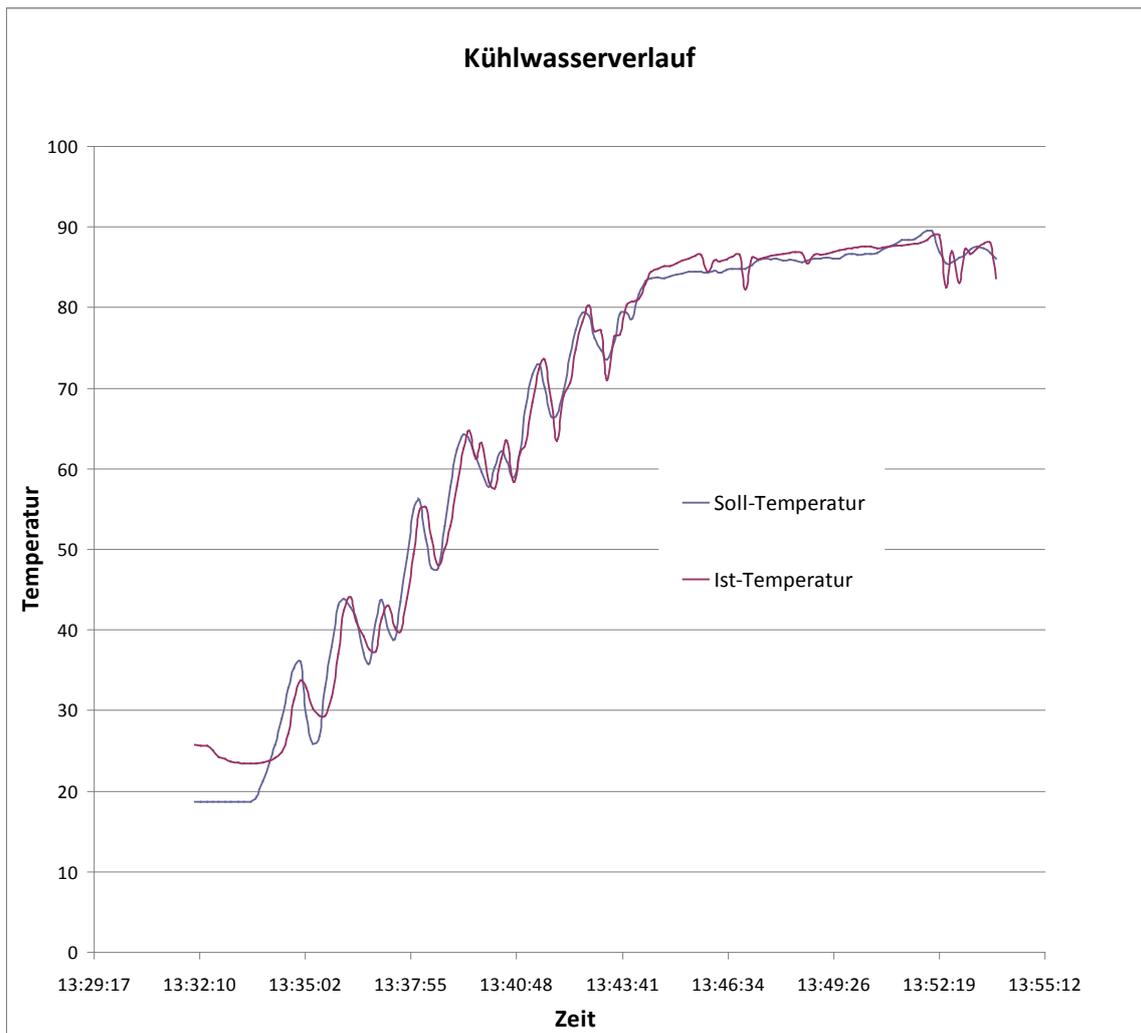


Bild 7: Kühlwassertemperaturverlauf Soll/Ist-Vergleich

4.7 Validierung des mobilen Kühlkreislaufes

4.7.1 Ausgangssituation

Während dem Nachfahren des NEFZ-Zyklus zeigten die Kontrollparameter eine deutliche Abweichung zwischen aktuellem Soll-, und Istwert. Die Regelung des mobilen Kühlkreislaufes war in Summe zu träge, um dem Verlauf der Kühlwassererwärmung zu folgen. Die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Temperatur war unakzeptabel groß (die beiden Graphen in Abbildung 40 visualisieren die Problematik). Nach mehreren Testläufen zeichnete sich eine falsch eingestellte Regelung des mobilen Kühlkreislaufes ab. Das Temperiergerät wird durch einen PID-Regler geregelt, welcher über zahlreiche Einstellmöglichkeiten verfügt. Diese

Einstellmöglichkeiten besitzen jedoch einen enormen Umfang und soll mit Hilfe einer geeigneten Methode Analysiert werden.

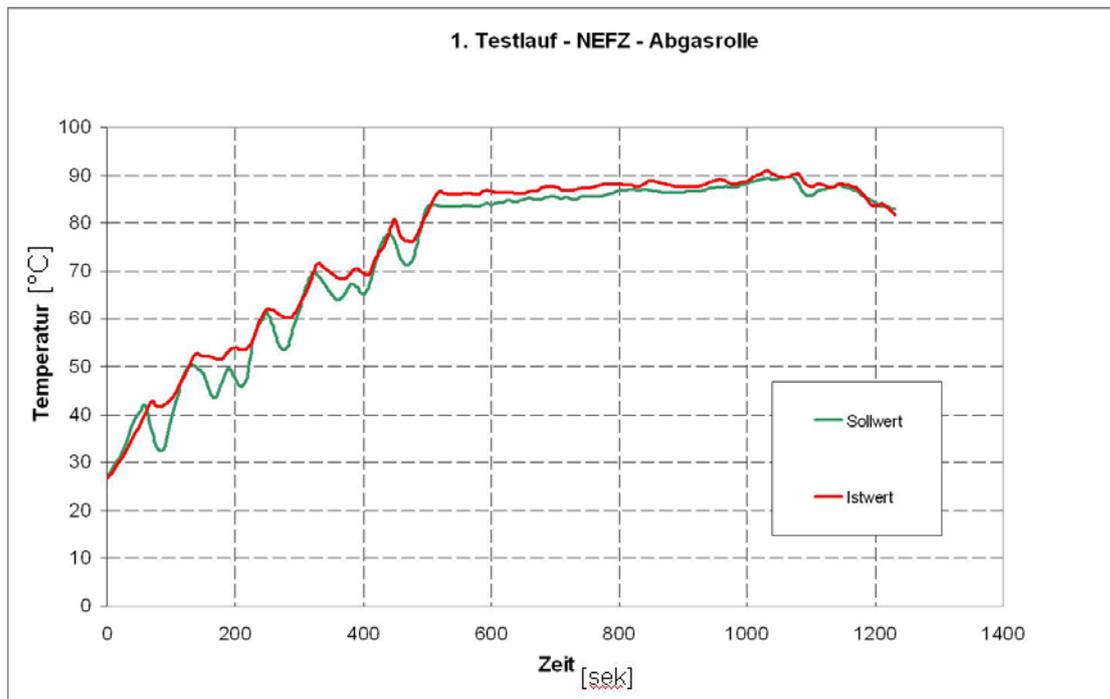


Bild 8: Regelverhalten zwischen Soll- und Istwert

4.7.2 Das Ziel der Regelgenauigkeit

Zielsetzung ist die Validierung des mobilen Kühlkreislaufes inklusiver Anpassung des PID-Reglers zur Verringerung der Regelabweichung zwischen Sollwert- und Vorlauftemperatur. Die Abweichung in X-Richtung soll maximal einen zeitlichen Versatz von plus/minus zwei Sekunden haben. In Y-Richtung soll die Temperaturdifferenz ebenfalls nicht größer als plus/minus zwei Grad Celsius betragen.

4.7.3 Toleranzgrenzen

Die roten Graphen bilden die Toleranzgrenzen des Temperaturverlaufes ab. Damit die Regelung des Temperiergerätes ordnungsgemäß funktioniert, muss der Istwertverlauf innerhalb dieser Grenzen (in der Zeichnung 42 mit „Lower_Bound“ und „Upper_Bound“ beschriftet) liegen. In der unten abgebildeten Grafik ist zu erkennen,

dass die Istwertkurve die vorgegebenen Grenzen überschreitet. Dies muss durch die Anpassung der Regelung verbessert werden.

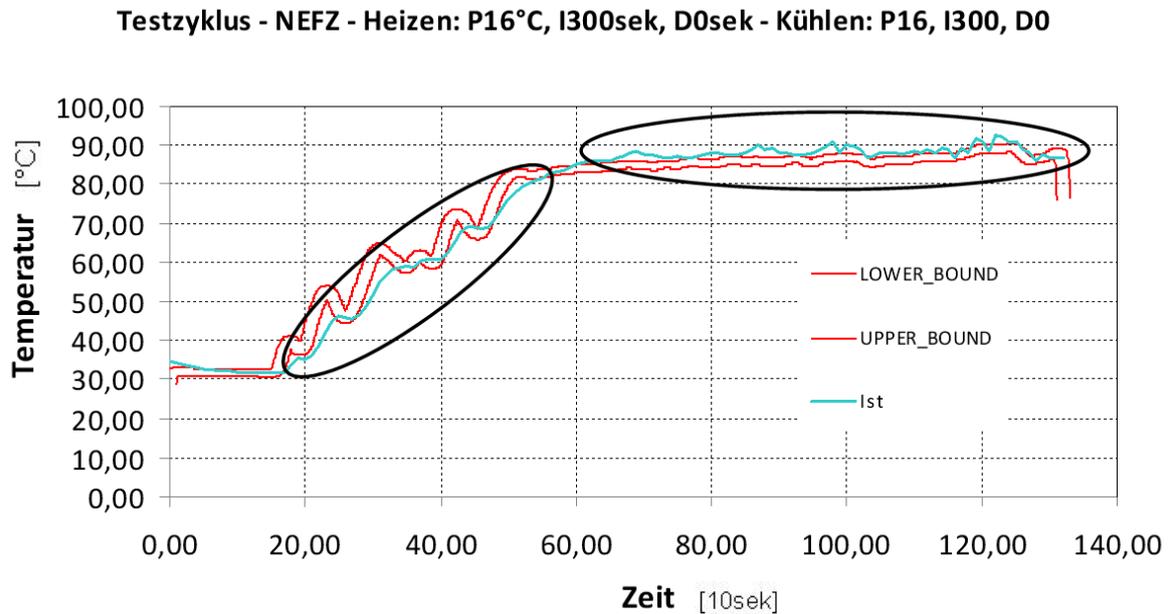


Bild 9: Grenzüberschreitungen aufgrund nicht angepasstem PID-Regler

4.7.4 Ergebnis

Die Tabelle 4 stellt Ausschnitte verschiedener Temperaturverläufe gegenüber. Es wird ein Vergleich zwischen Vorher und Nachher gezogen. Die Temperaturverläufe sind jeweils Ausschnitte aus dem transienten und dem stationären Bereich. Hierbei wird deutlich, dass in beiden Bereichen die Regelung anfangs nicht passend eingestellt war. Durch die Reglereinstellung im Bereich Heizen und Kühlen ist es nun möglich, dass sich der Temperaturverlauf innerhalb der aufgeführten Toleranzgrenzen bewegt.

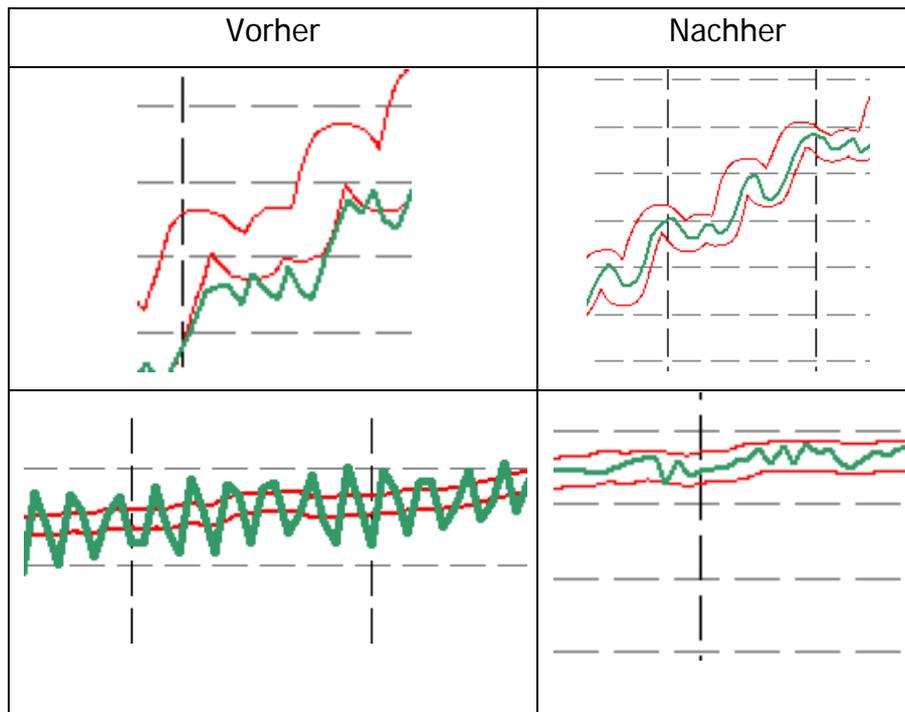


Bild 10: Soll- und Istwertvergleich nach PID-Regler Optimierung

5 Das TEG-Bypass Design

Aufgrund der maximal verträglichen TE-Materialtemperatur, wurde ein TEG-System mit Bypassfunktion gewählt. Es entsteht die Möglichkeit bei zu hohen Temperaturen den Abgasmassenstrom am TEG vorbei zu führen um das TE-Material vor Überhitzung zu schützen. Man hat sich für die Umschaltung vom TEG-Modus in den Bypass-Modus für ein 3/2- Wegeventil, auch Y-Klappe genannt, entschieden. Diese ermöglicht eine einfache Umschaltung und je nach Aktuator sind auch Zwischenstellungen möglich. Es ist möglich mit Zwischenstellungen nur Teile des Massenstromes in den Pfad des TEGs zuführen und somit die Gesamtenergie, die der TEG in elektrischen Strom umwandeln kann, zu regeln.

Die Aufgabe von Tenneco war es, das Design des Bypasses zu erstellen und in Absprache mit Behr-Mahle deren TEG-Design in das Bypass-System zu integrieren.

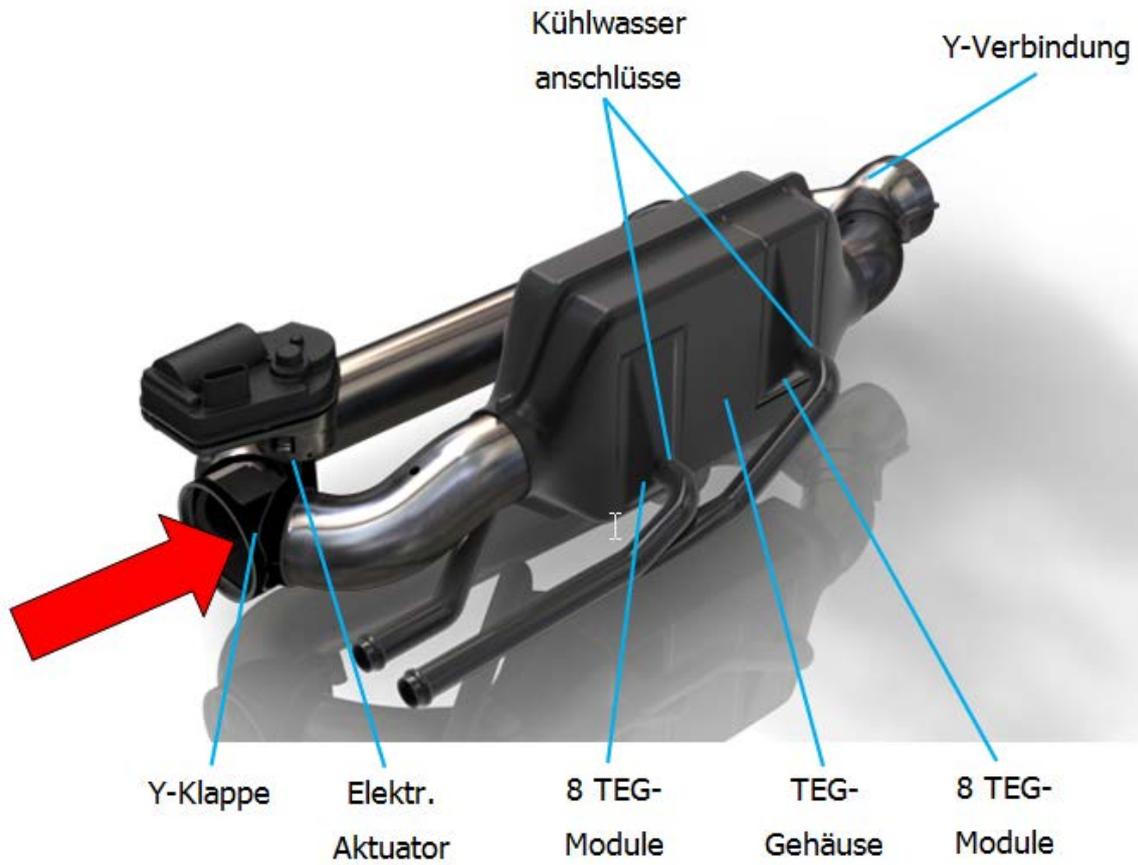


Bild 11: TEG-System mit Bypass

6 Charakterisierung der Y-Klappe

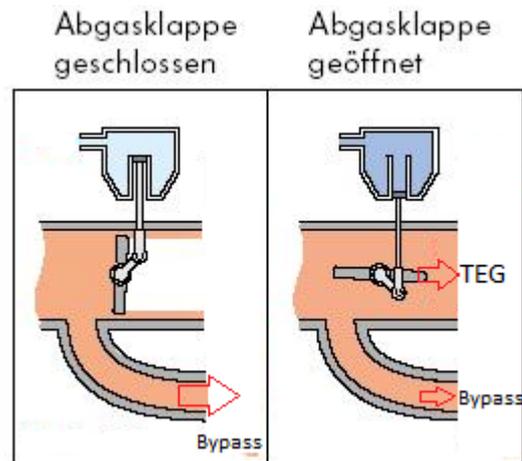


Bild 12: Prinzip einer Klappe

Mit der Abbildung links wird ein Beispiel für eine Abgasklappe gezeigt, bei der ein pneumatisch mit Unterdruck betätigtes Ventil eine Klappe im Hauptstrang steuert. Bei geschlossener Stellung, wird der Abgasstrom über einen Bypass am später angeordneten TEG vorbeigeführt. Die Betätigung kann auch über ein elektrisches Stellglied erfolgen.

Es ergab sich die Aufgabe, den Zusammenhang zwischen dem Massenstrom, der Winkelstellung und den Stellkräfte an einer Abgasklappe, sowie auch der Temperatur zu verstehen. Hierzu ist es notwendig sich der allgemeinen Funktionsweise thermoelektrischer Materialien und den regelbaren Parametern eine Abgasklappe klar zu sein. Diese ergeben sich aus der Geometrie und der Anordnung der Bauteile des später gewählten Systems.

Dafür muss ein Prüfaufbau komplementiert werden, der alle nötigen Messwerte erfassen kann. Diese Messwerte müssen dargelegt und auf mögliche Fehler überprüft werden. Anhand der Ergebnisse soll ein geeignetes elektrisches Stellglied mit passender Ansteuerung ermittelt werden, der die Regelklappe in vorgegebenen Zyklen verfahren kann.

6.1 Y-Klappe

Die gewählte Klappe ist ein 3/2-Wegeventil welches durch eine freistehende Welle die Ventilklappe über einen Aktuator geöffnet, geschlossen oder Zwischenstellungen angefahren werden können.

Diese Klappe wurde gewählt, da die Aufteilung symmetrisch über zwei Ableitungen mit gleichem Durchmesser geführt werden kann. Dadurch wird der Bypasskanal und der TEG-Kanal mit gleichem Querschnitt angeströmt.

Der Eingangsdurchmesser, welcher direkt mit dem Hauptabgasrohr verbunden wird, hat einen Innendurchmesser von 67,6mm. Die zwei Abzweige haben jeweils einen Durchmesser von 51,9mm.

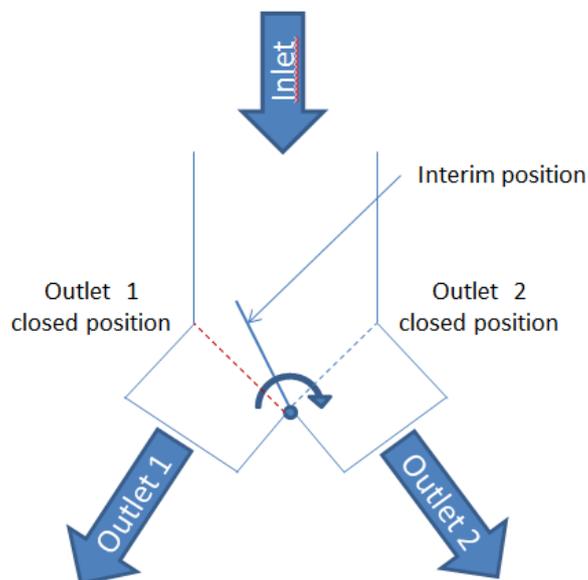


Bild 13: Prinzip einer Y-Klappe bzw. 3/2-Wegeventil

6.2 Aktuator

Bei Tenneco wurde bereits in einem Projekt ein elektrischer Aktuator für eine Abgasregelklappe appliziert. Hierbei handelt es sich um einen Stellmotor, der vor der Abgasblende im Abgasrohr das Akustik- und Strömungsverhalten mittels einer Abgasklappe beeinflusst. In diesem Fall werden nur zwei Stellungen - auf oder zu - angefahren.

In dem Fall des TekoCar-TEG Projekts muss dieser Aktuator aber vollvariabel bzw. kleine Gradstellungen von $\pm 2^\circ$ anfahren können. Diese konnte mit Hilfe einer Software für den Versuch gelöst werden, die über ein PWM-Signal Stellungen von $\pm 1^\circ$ anfahren kann.

Um Aufwand und Kosten zu sparen, soll in dem TEG-System ebenfalls dieser Aktuator verwendet werden.

6.3 Versuchsaufbau

Für eine genaue Bypass-Regelung und Analyse der Y-Klappe muss diese genau untersucht und charakterisiert werden. Dafür war es notwendig diese in einen Versuchsaufbau zu integrieren, der die notwendigen Messwerte erfassen kann. Diese wären die Massenströme vor und nach der Abzweigung und der statische Gegendruck des Systems. Für das Drehmoment, das während verschiedenen Massenströmen und Klappenstellungen auf die Klappenwelle wirkt, sollte eine Drehmomenterfassung integriert werden.

Durch die gegebenen Randbedingungen konnte für die hier beschriebene Arbeit nur ein Versuchsstand für Messungen mit Raumtemperatur benutzt werden. Messungen auf einem Heißgasprüfstand waren aufgrund der Belegungszeit und vor allem wegen der schwierigen Messwerterfassung wie z.B. Massenstrom nicht möglich.

Um die Auswirkungen im späteren Einsatz unter Heißgasen absehen zu können, war es dadurch notwendig die Temperaturen später, unter der Bedingung der gleichbleibenden Strömungsverhältnisse, hochzurechnen.

6.4 Massenstromerfassung

Die Massenströme vor und nach der Y-Klappe wurden mit insgesamt 3 Sensoren erfasst. Der Sensor vor der Abzweigung ist in der Laborzuleitung hinter dem Verdichter- und Bypass-Ventil. Die zwei Sensoren hinter der Abzweigung/Aufteilung wurden in dem Versuchsaufbau eingesetzt.

Als Sensoren wurden thermische Masse-Durchflussmesser verwendet. Diese arbeiten nach dem thermischen Messprinzip eines Heißfilm-Anemometers. Es nutzt die strömungsabhängige Abkühlung eines erhitzten Widerstands, der dann als

Messsignal ausgewertet und an ein Speise-/Auswertegerät weitergegeben wird. Dieser gibt den Wert dann in digitaler Form aus.

6.5 Drehmomentprüfstand

Die aus der Strömung resultierenden Druckkräfte auf die Klappe mussten für eine spätere Aktuator-Auswahl aufgenommen werden. Hierfür wurde ein Prüfstand verwendet, der für die Entwicklung eines Abgasklappenventils aufgebaut wurde. Dieser wurde auch schon für die direkte Anbindung des SBS-Aktuators ausgelegt. Der Prüfstand musste um eine manuelle Verstell- und Arretier-Einrichtung erweitert werden, um die Kräfte der Klappe in vordefinierten Stellungen zu ermitteln.

6.6 Gesamtaufbau

Für die Luftmassensensoren musste beachtet werden, dass die Zufuhrleitung in der Länge ausgeführt wird, damit die Strömung sich ausreichend beruhigen kann. Die Y-Klappe wurde in den Aufbau eingeschweißt und mit einem Halter gefügt, der sich mit dem vertikal ausgerichteten Drehmomentprüfstand koppeln lässt.

6.7 Auswertung

Für den ersten Versuchsdurchlauf wurden bei Raumtemperatur 5°-Schritte gewählt. In jeweils jeder Position wurde der Massenstrom in der Zuleitung von 40-700kg/h schrittweise erhöht. Um eine genau Analyse für den NEFZ im Massenstrombereich bis 200 kg/h zu ermöglichen, wurden bis dahin 25kg/h-Schritte gewählt, danach 50kg/h-Schritte.

Durch diese Anordnung sollte bei 0° der Massenstrom komplett durch Strang 1 geführt werden. Umgekehrt bei 60° durch Strang 2. Da der Versuch komplett symmetrisch aufgebaut ist, wird sich im Folgenden hauptsächlich auf Strang 2 bzw 30°-60° bezogen.

Des Weiteren wird der Aufbau in 2 Systeme unterteilt, um für eine spätere Analyse vereinfacht die symmetrische, parallele Aufteilung zu veranschaulichen.

6.7.1 Massenstromaufteilung

Im folgenden Diagramm wird die prozentuale Aufteilung des Gesamtmassenstroms, auf das System 2 (30°-60°) bezogen, angezeigt:

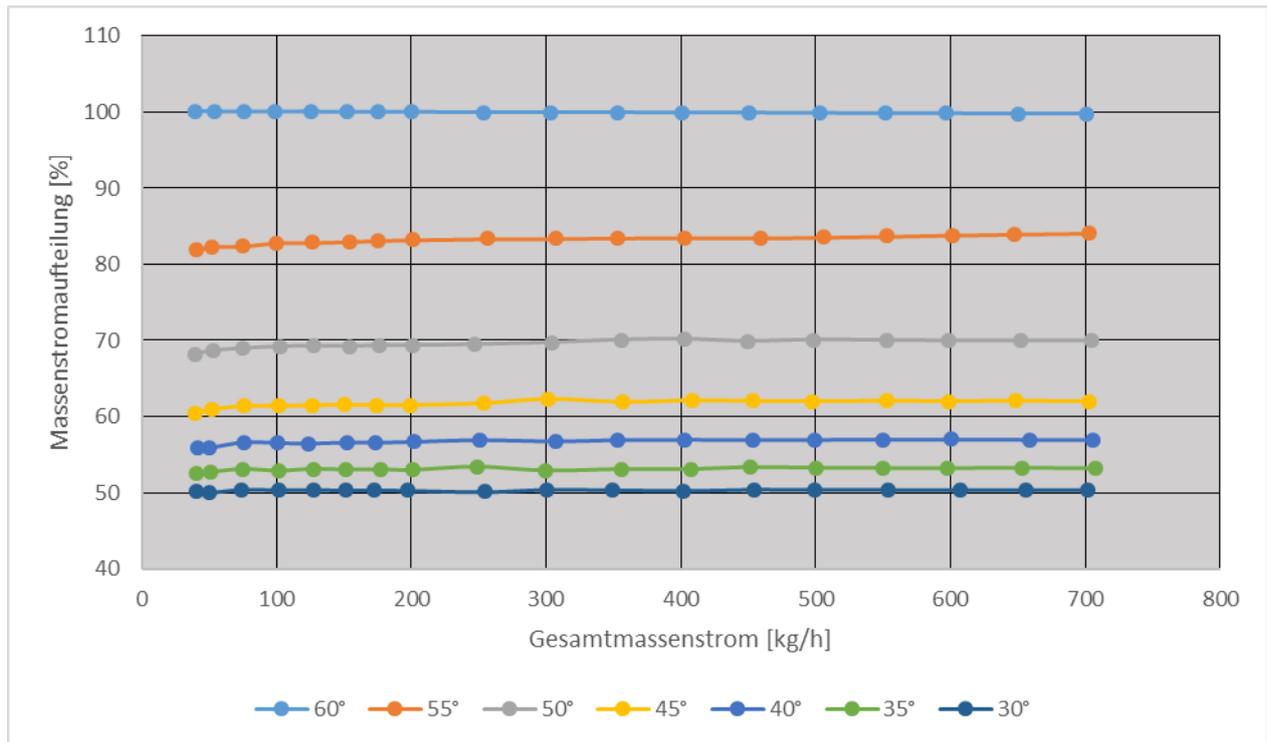


Bild 14: Aufteilung der Massenströme in Abhängigkeit der Klappenstellung

Es ist zu sehen, dass sich der Massenstromaufteilung über den größten Teil konstant verhält. Lediglich im Bereich zwischen 55°-45° ist ein leichter linearer Anstieg, der im Verhältnis durch Strang2 geführten Luftmasse im unteren Gesamtmassenstrombereich (< 300 kg/h) zu erkennen.

Über den kompletten Verlauf betrachtet, bleibt die Abweichung < 5% und kann aufgrund von Messabweichungen und dem kalibrierten Messbereich >20kg/h der Massenstrommessgeräte vernachlässigt werden.

Nach dem Versuchsdurchlauf wurde zur besseren Übersicht und für die spätere, einfachere Anwendung in sogenannte „Massenstromdivisoren“ (nachfolgend engl. massflowdivisor genannt) umgerechnet.

$$\text{massflowdivisor}_1 = \frac{\dot{m}_{\text{ges}}}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{\dot{m}_1}$$

$$\text{massflowdivisor}_2 = \frac{\dot{m}_{\text{ges}}}{\dot{m}_2} = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{\dot{m}_2}$$

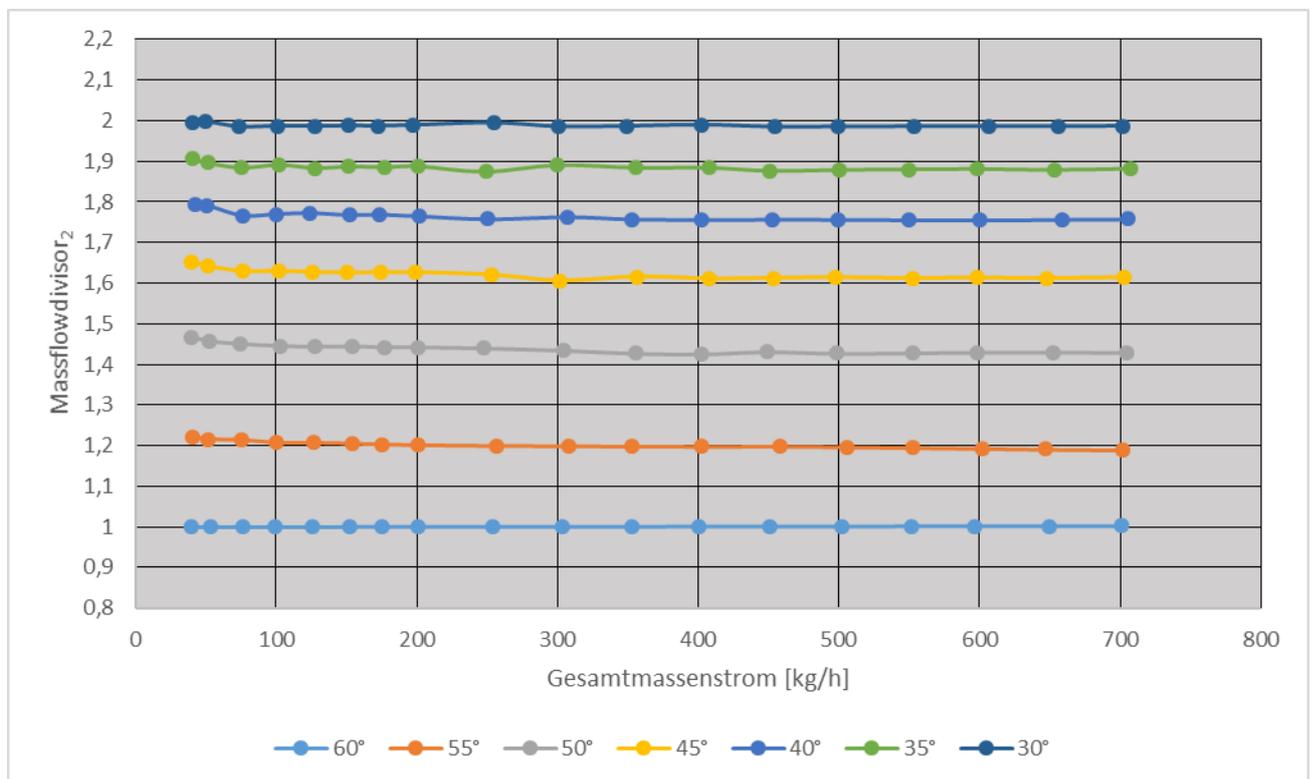


Bild 15: Massenstromaufteilung als Massflowdivisor der Winkelstellungen

6.7.2 Drehmoment

Das Drehmoment wurde jeweils statisch bei eingestelltem Massenstrom und arretierter Klappenstellung erfasst. Es gilt zu beachten, dass diese Werte ausschließlich in ruhender Position ermittelt wurden und keine dynamischen Verstellkräfte darlegen.

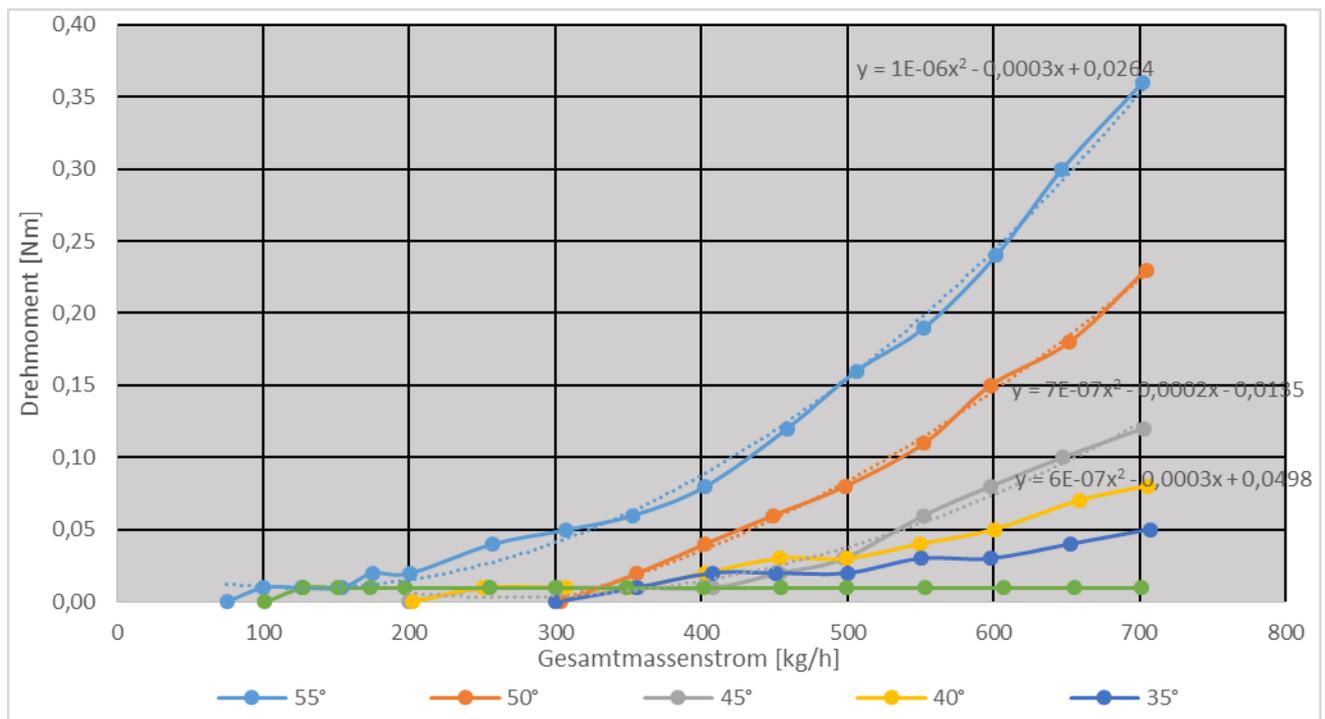


Bild 16: Drehmoment in Abhängigkeit des Gesamtmassenstroms

Es wurde jeweils der erste Wert, der 0,0Nm übersteigt, übertragen. Bei 30°, also genau die mittige Stellung der Y-Klappe, ergibt einen konstanten Verlauf bei 0,01Nm. Dieser kann als Messfehler angenommen werden und zeigt, dass in dieser Stellung keine Kraft auf die Klappe wirkt.

Je enger die Klappe sich gegen Anschlag bewegt, ergibt der Verlauf die Kurve einer Polynomfunktion zweiten Grades. Hiermit werden die zu übertragenden Kräfte in den engen Klappenstellungen verhältnismäßig höher.

6.7.3 Anwendung der Umrechnung

Die errechneten Bauteilkennwerte des Prüfaufbaus in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl wurden in ein bestehendes Programm implementiert. Durch das programmseitige Zusammensetzen der Bauteile wie im Prüfaufbau und unter Berücksichtigung der jeweilig passenden Massenstrom-divisoren für die Klappenstellung, kann man durch Eingeben von Heißgastemperaturen den dadurch entstehenden Druckverlust ausrechnen.

Anhand dieser Rechnung, kann für einen späteren Prüfaufbau mit einem TEG-Dummy oder einer kompletten Abgasanlage mit TEG, der Druckverlust errechnet werden.

Maßgeblich für die Arbeit waren die Bauteilkennwerte für die Y-Klappe in 5°-Schritten. Diese Werte der Klappe können beliebig mit weiteren Bauteilkennwerten, die wiederum aus Simulationsprogrammen für 1D-CFD Berechnung ermittelt werden, erweitert werden.

6.7.3.1 Ergebnisse der Klappenuntersuchung

Aufgrund der nichtgegebenen Möglichkeit der Massenstromerfassung mittels Heißdrahtsensoren bei Heißgastemperaturen, mussten diese analytisch hochgerechnet werden. Für diese Hochrechnung musste der Nachweis gleichbleibender Strömungsbedingungen im System erbracht werden. Dieser Mehraufwand führte im Verlauf der Arbeit zu einer Änderung, welche letztendlich nicht mit dem Charakterisieren des Regelverhaltens endete, sondern die strömungstechnische Grundlagenermittlung eines Abgasventils ermittelte. Dieses Verhalten des Gases an der Klappe wurde zuvor anders eingeschätzt.

Es wurden Messungen an der Y-Klappe durchgeführt die zeigten, welche Massenströme bei welcher Winkelstellung durch den Bypass-Pfad bzw. durch den TEG-Pfad strömen. Die Messungen wurden in 5°-Schritten bei Raumtemperatur durchgeführt. Es wurde eine Basis erstellt, die es ermöglicht, die kalt gemessenen Strömungen in heiße Strömungen und deren Eigenschaften umzuwandeln. Dabei war

es für die Basiserstellung von Bedeutung, abzusichern, dass stets eine turbulente Strömung vorliegt.

Es wurde auch nachgewiesen, dass der angedachte Aktuator aus Sicht der Verstellkräfte geeignet ist.

Diese Nachweise wurden erbracht und der Aktuator kann somit verwendet werden.

7 Ausblick

Aus der Sicht von Tenneco ist die Thermoelektrik derzeitig noch nicht soweit um in einem Fahrzeug in Serie zu gehen. Verschiedene Herausforderungen sind noch zu lösen:

- Exakte Bestimmung der Festigkeitswerte von den möglichen TE-Materialien notwendig
 - Max. Zug- Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur
 - Max. zulässige Scherspannung in Abhängigkeit der Temperatur
- Dauerfestigkeit der TE-Materialien während der Anwendung in einer Abgasanlage in Verbindung mit transienten Temperaturen
 - Straßenanregung
 - Motorvibration
 - Pulsation
 - Oxidation durch Kondensat

Der TEG hat in der Anwendung in der Abgasanlage den Vorteil, dass er einfach integriert werden kann, insofern die oben angeführten Punkte gelöst sind. Um die Attraktivität eines TEGs im Kfz zu steigern, sollte zudem beachtet werden, dass die Module in einer Art „Plug & Play“ Ausführung gestaltet sind. Ein Modul das einfach zu integrieren ist und damit keine großen Einbaukosten verursacht, wird die Abgasanlagenhersteller am meisten interessieren, da die Anbindungstechnik und die notwendigen Maschinen dazu, bei den meisten nicht vorhanden sind und erst gekauft werden müssen. Ein weiterer Punkt sind die Spannungen innerhalb des Moduls bei der Aufheizung und Abkühlung. Die hier entstehenden Thermospannungen sind eine der Hauptursachen für das Versagen des TEGs, hervorgerufen durch die

verschiedensten Arten des Modulbruches. Zielführend ist an dieser Stelle, dass diese Spannungen innerhalb des Modules reduziert werden.

Eine weitere Herausforderung aus der Sicht der Abgasanlagenhersteller ist, dass mit immer engeren Bauräumen umgegangen werden muss. Zudem sind diese nur selten gerade und eben um mit flachen Modulen vernünftig ausgenutzt werden zu können. Aus dieser Sicht sollten die Module entsprechend klein sein um dem Unterboden besser folgen zu können.

Edenkoben, 03.08.2015

Michael Miersch