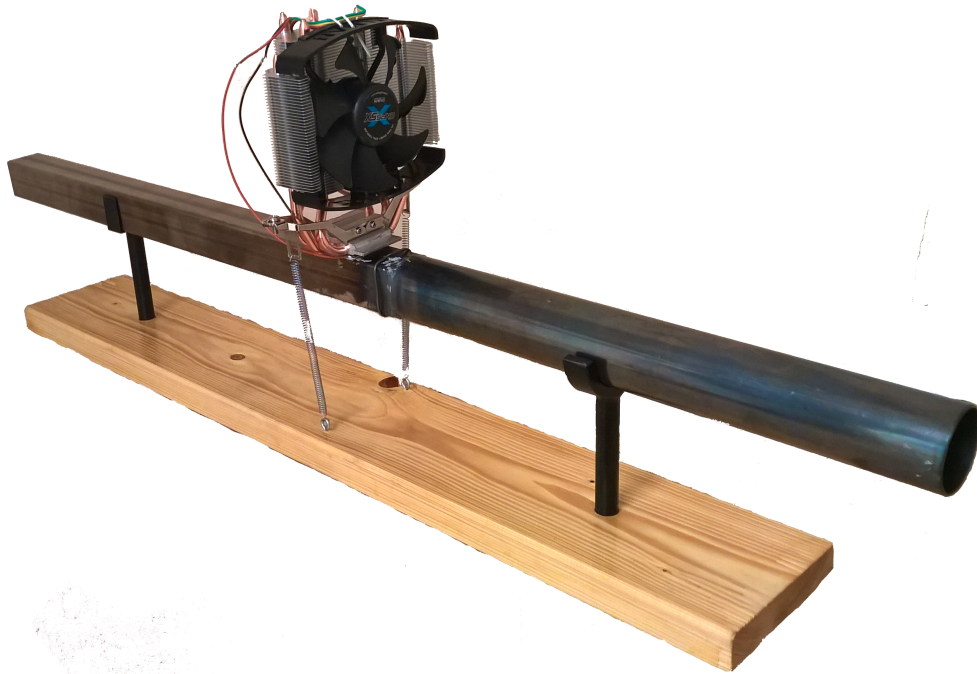




**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---



# Termoelektrisk värmeåtervinning från fordonsavgaser

En studie om elgenerering med Peltierelement

Kandidatarbete inom Tillämpad Mekanik

JOHAN FORSGREN  
ALEXANDER MALMBERG  
AREZ MOHIDEEN  
KAJSA STRANDBERG  
RICKARD ZÄTHER

---

Institutionen för Tillämpad Mekanik  
*Avdelning för Förbränning*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2015  
Kandidatarbete 2015:01



Kandidatarbete 2015:01

# **Termoelektrisk värmeåtervinning från fordonsavgaser**

En studie om elgenerering med Peltierelement

Kandidatarbete inom Tillämpad Mekanik

JOHAN FORSGREN  
ALEXANDER MALMBERG  
AREZ MOHIDEEN  
KAJSA STRANDBERG  
RICKARD ZÄTHER

Institutionen för Tillämpad Mekanik

*Avdelning för Förbränning*

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2015

# Termoelektrisk värmeåtervinning från fordonsavgaser

*En studie om elgenerering med Peltierelement*

JOHAN FORSGREN  
ALEXANDER MALMBERG  
AREZ MOHIDEEN  
KAJSA STRANDBERG  
RICKARD ZÄTHER

Handledare: Sven B Andersson  
Examinator: Karin Munch

© JOHAN FORSGREN, ALEXANDER MALMBERG, AREZ MOHIDEEN,  
KAJSA STRANDBERG, RICKARD ZÄTHER, 2015

Kandidatarbete 2015:01  
ISSN 1654-4676  
Institutionen för Tillämpad Mekanik  
Avdelning för Förbränning  
Chalmers Tekniska Högskola  
SE-412 96 Göteborg  
Sverige  
Telephone + 46 (0)31-772 1000

Omslagsbild:

Bilden visar prototypen som är byggd under projektet för att illustrera ett avgasrör. Monterat på röret sitter ett Peltierelement och en kylfläkt.

Chalmers Reproservice  
Göteborg, Sweden 2015

# Förord

Detta är ett kandidatarbete skrivet på institutionen för Tillämpad Mekanik vid Chalmers Tekniska Högskola under våren 2015. Arbetet utfördes av en grupp studenter ifrån programmen Maskinteknik och Kemiteknik. Projektet är en blandning mellan teoretisk och experimentell forskning med syfte att undersöka möjligheterna för användandet av termoelektriska generatorer inom energiåtervinning ifrån fordonsavgaser.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Sven B Andersson som tillsammans med Gunnar Latz visat ett stort engagemang och väglett oss under vårt arbete. Sven och Gunnar har under processen gett oss god återkoppling och har alltid svarat på våra frågor och visat intresse för arbetets utveckling. Vi vill även tacka vår examinator Karin Munch som gav oss möjligheten att genomföra detta projekt.

Avdelningarna Förbränning samt Strömningsmekanik på institutionen för Tillämpad Mekanik på Chalmers har bidragit med hjälp och gett oss tillträde till deras lokaler och utrustning. För detta är vi mycket tacksamma. Vi har även fått råd och vägledning under användandet av programvarorna *ANSYS CFD*, *Fluent* samt *EnSight*. Ett särskilt tack vill vi därför rikta till Patrik Wåhlin, Valery Chernoray, Ardalan Javadi, Borja Rojo och Ragnar Larusson för deras hjälp.

Under arbetets gång har vi haft kontakt med forskare på Chalmers inom området termoelektricitet. Vi vill därför rikta ett stort tack till Anders Palmqvist och Olle Höglom på institutionen för Kemi och Kemiteknik för att ni tog er tid att förklara för oss vad ni arbetar med.

Slutligen vill vi även tacka personalen i Prototyplabbet på Maskinteknik som har gett oss råd och tips, lånat ut sin privata utrustning samt hjälpt oss att utforma våra idéer.



# Abstract

In modern society, environmental issues have become one of the most important questions. To minimize energy losses and to create a sustainable future are both goals that many countries share. Today, vehicles lose about one third of the energy inserted in the engine as heat in the exhaust gases. The project, based at the Department of Applied Mechanics at Chalmers University of Technology, evaluated the possibility of exhaust waste heat recovery in vehicles with thermoelectricity. The goal was to use thermoelectric generators, in this case Peltier elements, on the exhaust system to enhance the fuel efficiency of the vehicle. During the project, only material available on the market today were evaluated. No research in new materials has been implemented.

Simulations, calculations and experiments evaluated the problem. In order to evaluate how fins and geometrical changes affected the exhaust system, simulations was conducted. Experiments examined the possibilities of Peltier elements and how they would behave if multiple ones were connected. The calculations were then made to evaluate the potential of Peltier elements in the exhaust system.

The results revealed the problems using thermoelectric generators in vehicle applications. These problems are due to the increased backpressure that comes with changes in the exhaust system, which impairs the engine. For the same reasons, fins have a negative effect on the vehicle for inside the exhaust system as well as outside. The low efficiency of the thermo electrical generator makes it, with the materials being used today, hard to apply in vehicles. If better materials with higher efficiency can be found, the potential of thermoelectric generators in vehicles is promising.

**Keywords:** Thermoelectric generator, TEG, Peltier element, Thermoelectricity, Heat recovery, Exhausts, Combustion engine, Sustainable energy



# Sammanfattning

I dagens samhälle växer ständigt intresset för miljöfrågor och att minimera energiförluster för att skapa ett mer hållbart samhälle. Inom fordonsindustrin försvinner idag runt en tredjedel av den effekt som tillförs motorn via bränslet som värme med avgaserna. Projektet, som har genomförts för institutionen för Tillämpad Mekanik på Chalmers Tekniska Högskola, grundade sig i att ta till vara på denna spillvärme med hjälp av termoelektriska generatorer. Syftet var att undersöka möjligheten i att öka bränsleeffektiviteten genom applicering av Peltierelement längs avgassystemet. Projektet behandlade endast material som idag finns på marknaden och utveckling av nya material bearbetades ej.

Problemet undersöktes genom simuleringar, beräkningar och experiment. Simuleringar genomfördes för att undersöka hur förändring av avgassystemets geometriska uppbyggnad och användandet av flänsar påverkade fordonet. Experimenten undersökte möjligheten och effektiviteten hos Peltierelement samt hur de beter sig vid sammankoppling av flera. Beräkningar gjordes sedan för att utvärdera olika möjligheter att utnyttja Peltierelement i avgassystemet.

Resultaten visade svårigheter i att använda termoelektriska generatorer på ett fordon. Dessa svårigheter grundar sig i ökat mottryck i motorn vid geometriförändringar av avgassystemet. Av samma anledning ansågs dessutom applicering av flänsar på insidan och utsidan av röret svårtillämpat. De låga verkningsgraderna i dagens termoelektriska generatorer gör att det i dagsläget är svårt att motivera att konceptet skall appliceras i fordon. I framtiden, om bättre och billigare material kan utvecklas, finns en lovande potential för tekniken.



# Innehållsförteckning

<b>NOMENKLATUR</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>3</b>
1.1 BAKGRUND .....	3
1.2 SYFTE.....	3
1.3 PROBLEMBESKRIVNING .....	3
1.4 AVGRÄNSNINGAR.....	4
<b>2 TEORI</b> .....	<b>5</b>
2.1 TERMOELEKTRISKA GENERATORER.....	5
2.1.1 HUR TERMOELEKTRICITET FUNGERAR PÅ ATOMNIVÅ .....	5
2.1.2 MATERIAL I PELTIERELEMENT.....	6
2.1.3 ELLÄRA .....	7
2.1.4 ANVÄNDNING AV PELTIERELEMENT.....	7
2.1.5 SAMMANKOPPLING AV PELTIERELEMENT .....	8
2.2 FÖRBRÄNNINGSMOTOR .....	9
2.2.1 FRÅN BRÄNSLE TILL ARBETE .....	9
2.2.2 FÖRBRUKNINGSVÄRDE.....	9
2.2.3 AVGASSYSTEM .....	9
2.2.4 KYLNING AV AVGASER .....	12
2.2.5 MOTTRYCKETS BETYDELSE .....	12
2.3 STRÖMNINGSMEKANIK.....	13
2.4 VÄRMEÖVERFÖRING .....	15
2.4.1 LEDNING.....	15
2.4.2 KONVEKTION.....	16
2.4.3 VÄRMEÖVERFÖRING OCH EFFEKTPÅVERKAN .....	17
2.4.4 FLÄNSAR .....	18
2.4.5 TERMOELEKTRISK GENERERING OCH BRÄNSLEFÖRBRUKNING .....	20
<b>3 METOD</b> .....	<b>21</b>
3.1 SIMULERINGAR I <i>CFD</i> .....	21
3.2 EXPERIMENT .....	22
3.2.1 VÄRMEÖVERFÖRING I RÖR.....	22
3.2.2 MAXIMAL EFFEKT UR ETT PELTIERELEMENT.....	22
3.2.3 EFFEKTENS BEROENDE AV TEMPERATURSKILLNADEN .....	23
3.2.4 EFFEKT MED TVÅ PELTIERELEMENT .....	23
3.3 BERÄKNINGAR AV VÄRMEÖVERFÖRING .....	23
3.3.1 VÄRMELEDNING PÅ INSIDA OCH UTSIDA .....	23
3.3.2 ENERGIFLÖDE AV FLÄNSAR .....	24
3.3.3 LUFTMOTSTÅND AV FLÄNSAR.....	24
3.3.4 MOTTRYCK.....	24
3.3.5 MATERIALETS PÅVERKAN.....	24
3.3.6 OPTIMAL FLÄNSHÖJD.....	24
<b>4 RESULTAT</b> .....	<b>25</b>
4.1 SIMULERINGAR I <i>CFD</i> .....	25

<b>4.2</b>	<b>EXPERIMENT</b>	<b>28</b>
4.2.1	VÄRMEÖVERFÖRING I RÖR	28
4.2.2	MAXIMAL EFFEKT UR ETT PELTIERELEMENT	29
4.2.3	EFFEKTENS BEROENDE AV TEMPERATURSKILLNADEN	30
4.2.4	EFFEKT MED TVÅ PELTIERELEMENT	30
<b>4.3</b>	<b>BERÄKNINGAR AV VÄRMEÖVERFÖRING</b>	<b>31</b>
4.3.1	VÄRMELEDNING PÅ INSIDA OCH UTSIDA	31
4.3.2	ENERGIFLÖDE AV FLÄNSAR	31
4.3.3	LUFTMOTSTÅND AV FLÄNSAR	33
4.3.4	MOTTRYCK	34
4.3.5	MATERIALETS PÅVERKAN	34
4.3.6	OPTIMAL FLÄNSHÖJD	35
<b>5</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>VÄRMEÖVERFÖRING</b>	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>EXPERIMENT</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>SLUTSATS</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>REFERENSER</b>	<b>43</b>
<b>APPENDIX</b>		<b>45</b>
<b>A.</b>	<b>BERÄKNINGAR</b>	<b>45</b>
A1.	KONVEKTIONS KONSTANTER	45
A2.	REYNOLDSTAL	45
<b>B.</b>	<b>MATLAB</b>	<b>46</b>
B1.	ENERGIFLÖDE GENOM VÄGGEN	46
B2.	FLÄNSEFFEKTIVITET	48
B3.	LUFTMOTSTÅND	49
B4.	LÄNGDBEROENDE	51
B5.	NETTOEFFEKT	52
<b>C.</b>	<b>TABELLER</b>	<b>55</b>
C1.	REYNOLDSTAL UNDER BILEN	55
C2.	EGENSKAPER I AVGASRÖRET	55
C3.	VÄRDEN PÅ BRÄNSLEENERGI FÖR BENSIN OCH DIESEL	55
<b>D.</b>	<b>CFD</b>	<b>56</b>
<b>E.</b>	<b>RITNINGAR</b>	<b>63</b>
<b>F.</b>	<b>INTERVJUER</b>	<b>66</b>
F1.	INTERVJU MED OLLE	66
F2.	INTERVJU MED ANDERS PALMQVIST	68
<b>G.</b>	<b>TEKNISKDATA FÖR PELTIERELEMENTET</b>	<b>71</b>

# Nomenklatur

## Förkortningar

Hg	Kvicksilver
LA4	Stadskörning, lätt körning
HWY	Ekonomisk Motorvägskörning
SC03	Aggressiv körning, stora hastighetsförändringar
US06	Körning med användning av luftkonditionering
CFD	Computational fluid dynamics (Datorbaserad numerisk strömningsberäkning)
FVM	Finita Volymmetoden
TEG	Termoelektrisk generator

## Symboler

A	Area [ $\text{m}^2$ ]
d	Diameter [m]
r	radie [m]
F	Kraft [N]
$F_D$	Luftmotståndskraft [N]
g	Gravitationskonstanten, 9,81 [ $\text{m/s}^2$ ]
h	Konvektionskonstant [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
m	Massa [kg]
$\dot{m}$	Massflöde [kg/s]
V	Volym [ $\text{m}^3$ ]
$\dot{V}$	Volymflöde [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
Q	Värmeeffekt [W]
q	Värmeöverföringshastighet [ $\text{W/m}^2$ ]
T	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ , alt K]
U	Spänning [V]
I	Ström [A]
R	Resistans [ $\Omega$ ]
P	Effekt [W]
L	Längd [m]
k	Värmeledningskoefficient [mK/W]
v	Hastighet [m/s]
U	Värmeöverföringskoefficient [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
x	Längd [m]

### Grekiska bokstäver

$\mu$	Dynamisk viskositet [kg/ms]
$\sigma$	Elektrisk ledningförmåga [S/m]
$\theta$	Temperaturdifferens [K]
$\rho$	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	Seebeck-koefficienten [V/K]
$\eta$	Verkningsgrad
$\lambda$	Materialkonstant [ $\sqrt{1/m}$ ]
$\Lambda$	Materialkonstant [ $W\sqrt{m}$ ]

### Index

x	Längd
D	Diameter
b	Bredd
inf	Fluid
f	Fena
c	Kritisk
H	Hög
L	Låg

### Dimensionslösa tal

ZT	Godhetstal
Re	Reynoldstal
Nu	Nusselts tal
Pr	Prandtls tal
$C_D$	Luftmotståndskoefficient
$\varepsilon$	Effektivitet

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

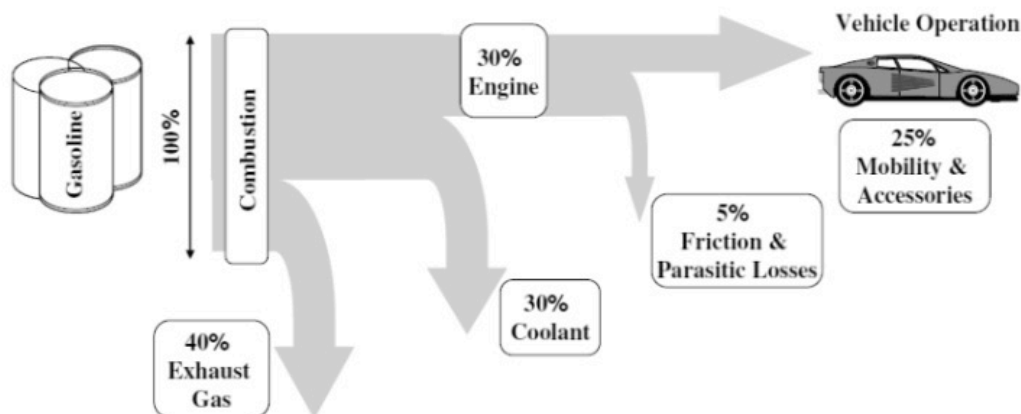
I dagens förbränningsmotorer kan endast cirka en tredjedel av energin i det tillförda bränslet användas till arbete. Resten förvinns som värmeförluster i kylningen av motorn eller strömmar ut med avgaserna [1]. I ett samhälle som strävar efter hög energieffektivitet finns därför ett behov av att kunna omvandla denna spillvärme till arbete. Således har metoder börjat utvecklas, bland annat för att kunna använda energin i avgaserna för att koka vatten som sedan driver en turbin eller kolvexpander. En annan teknik som är intressant är termoelektricitet där en termoelektrisk generator skapar en spänning med hjälp av den temperaturdifferens som finns mellan de olika sidorna på generatoren. Med dessa generatorer finns potential för värmeenergi i avgaserna att direkt omvandlas till elektrisk energi som kan användas i andra delar av fordonet. Sedan tidigare bedrivs forskning inom termoelektricitet på Chalmers Tekniska Högskola. Både professorer och doktorander strävar efter att finna nya material och metoder för att höja verkningsgraden hos termoelektriska generatorer.

## 1.2 Syfte

Projektets syfte är att utreda potentialen för termoelektrisk värmeåtervinning hos ett fordon för att öka bränsleeffektiviteten. Detta innefattar att bygga en termoelektrisk omvandlare som fungerar för att driva en fläkt och som kan användas för att analysera potentialen för värmeåtervinning.

## 1.3 Problembeskrivning

Projektets huvudfokus är att finna en väg att återvinna värmeförlusterna från en förbränningsmotor med hjälp av termoelektricitet. Mycket av den energi som tillförs motorn går till kylningsförluster i motorn samt värmeförluster med avgaserna. Detta illustreras i figur 1.1, som även visar att den största energiförlusten försvinner ut med avgaserna. De termoelektriska generatorerna ska ta upp en del av denna energi, men temperaturen på avgaserna kan dock inte sänkas obegränsat. Detta eftersom katalysator och andra filter i systemet inte kommer fungera optimalt vid lägre temperaturer [2]. Termoelektriska generatorer är uppbyggda så att då det finns en skillnad i temperatur mellan komponentens ovan- och undersida genereras en spänning. Här spelar material, generatorns design samt intervallet på värmedifferensen stor roll [3].



Figur 1.1 - Fördelningen av energi för en förbränningsmotor i en bil.

Ett av de största problemen i nuläget är att dessa generatorer har väldigt låg verkningsgrad. Avgassystemet, katalysatorn och motorn i ett fordon samverkar. Då en faktor i något av dessa system ändras för att gynna värmeöverföring mellan en termoelektrisk generator och avgaserna kan det resultera i ökad bränsleförbrukning. Detta på grund av förändrade förhållanden i motorn [4]. En del av problemet är att uppnå optimal temperaturskillnad mellan den varma och den kalla sidan av termoelektriska generatoren. Detta fenomen försvåras av det faktum att generatorerna är väldigt tunna.

## 1.4 Avgränsningar

Sedan tidigare finns det många metoder för att generera elektricitet av värme. Detta projekt begränsas till att endast undersöka termoelektrisk energiomvandling inom fordonsbranschen. Dessutom har det tidigare nämnts att termoelektrisk elgenerering är starkt materialberoende. Detta projekt fokuserar ej på utveckling av material, utan en förutsättning är att nyttja de produkter som finns på marknaden idag.

Under projektets gång finns en begränsad budget tillgänglig vilket påverkar val av komponenter till experimenten. Det bör dessutom nämnas att projektet är tidsbegränsat. Med avseende på detta begränsas antal möjliga iterationer av teoretiska och praktiska laborationer utav den avsatta tiden för projektet. Under försöken finns inte heller något fordon tillgängligt för att utnyttja avgaser till elgenerering. Emellertid genomförs laborationerna på så vis att relevant utvärdering av resultat möjliggörs.

## 2 Teori

Den teori som projektet baseras på börjar med vad en termoelektrisk generator är för något och hur de fungerar. Därefter presenteras fakta om förbränningsmotorn och hur bränsle blir till arbete samt hur de olika delarna i motorns cykel fungerar. Detta för att kunna utreda vart placering av en termoelektrisk generator skulle vara mest fördelaktig. För att kunna undersöka hur mycket värme som kan upptas och återvinnas med termoelektricitet har sedan en studie på strömningsmekanik och värmeöverföring gjorts. Samtidigt som teoretisk grund presenteras redovisas forskning som pågår på Chalmers Tekniska Högskola kring termoelektricitet som en kommersiell energikälla.

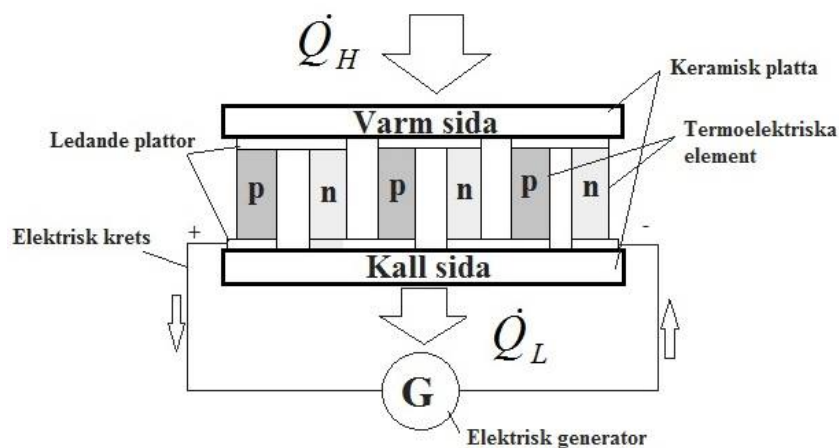
### 2.1 Termoelektriska generatorer

En termoelektrisk generator är ett föremål med endast fasta delar som kan generera elektrisk energi ifrån värmeenergi. En generator består av flera termoelektriska element som är sammankopplade. Genereringen grundar sig i den så kallade Seebeck-effekten som går ut på att skicka en ström genom elementen och få ut olika temperaturer på generatorns olika sidor. Denna effekt är uppkallad efter den tyske vetenskapsmannen Thomas Seebeck som kom fram till detta år 1821. Motsatsen till detta kallas för Peltiereffekt, vilket istället går ut på att erhålla ström genom att värma den ena och kyla den andra sidan på generatorn. Därmed fås en varm och en kall sida [3], se figur 2.1.

Peltierelement är de mest kommersiella termoelektriska generatorerna. Generatorerna har flera potentiella fördelar som gör att de skulle kunna vara användbara för att ta vara på värmeförluster som bildas inom olika applikationer. Bland annat bildas inga miljöpåverkande utsläpp från generatorn då elektricitet genereras. De kan även användas i stora temperaturspann och behöver inte underhållas efter montering. Dock bör även potentiella svagheter hos tekniken nämnas. Generatorerna har idag en relativ låg verkningsgrad och i bästa fall ligger den på ungefär fyra procent [3]. Därför har termoelektricitet i energikrävande applikationer ännu inte blivit kommersiellt erkänt och befinner sig i en utvecklingsfas. Framförallt används generatorerna i de fall där kostnaden spelar mindre roll och hållbarhet från en pålitlig kraftkälla eftersöks. Exempelvis kan tekniken förekomma i diverse rymdapplikationer, där det krävs en energikälla med försumbart underhåll samt att god temperaturskillnad kan erhållas. Principen utnyttjas även för att mäta temperaturen genom att räkna om den spänningsskillnaden som uppstår [3, 5].

#### 2.1.1 Hur termoelektricitet fungerar på atomnivå

Det som sker i ett termoelektriskt element på atomskala är att en tillförd temperaturgradient får laddningsbärare i materialet att diffundera från den varma till den kalla sidan. När materialet i den varma sidan blir uppvärmt så får atomerna större rörelseenergi. Eftersom rörelseenergin är större i den varma sidan än i den kalla så kommer en nettotransport av laddningsbärare ske mot den kalla sidan och på så sätt bildas en ström i samma riktning [6]. Termodynamikens första lag säger sedan att skillnaden mellan energin tillförd vid den varma sidan och energin bortförd från den kalla sidan utgör den genererade elenergin [3].



Figur 2.1. Komponenter i en enstegs termoelektrisk generator.  $\dot{Q}_H$  är tillförd värme på den varma sidan och  $\dot{Q}_L$  är bortförd värme på den kalla sidan.

Ett problem är att strömmen som genereras är mycket liten. För att lösa detta kan flera termoelektriska element seriekopplas. För att detta ska fungera så krävs speciella material som kan leda elektricitet med positiva partiklar istället för elektroner. Annars kommer strömmen som bildas i ledningarna mellan elementen vara riktad så att den motverkar spänningen som bildas i dem. Dessa material kallas halvledare och de kan leda elektricitet med både positiva partiklar samt med elektroner, och kallas då p-dopade respektive n-dopade [6]. I många termoelektriska generatorer används n- och p-dopade halvledare som kopplats ihop varannan p-, varannan n-dopad. Detta illustreras i figur 2.1. Dessa par med ett p- och en n-dopad element kallas termopar. I ett Peltierelement är flera termopar elektriskt seriekopplade och termiskt parallellkopplade. De är oftast fästa mellan två keramiska plattor som fungerar som elektriska isolatorer, men även bidrar med stabilitet till generatoren. Anslutningarna mellan generatoren och den varma eller kalla keramikplattan består av metaller med god ledningsförmåga, exempelvis koppar [3].

### 2.1.2 Material i Peltierelement

Fokus kommer inte ligga på materialutveckling i detta projekt. Dock bör viss fakta angående materialet nämnas eftersom det är relevant för resten av rapporten. De viktiga aspekterna som är avgörande termoelektricitet återges av ekvation 2.1 [3].

$$ZT = \frac{T\alpha^2\sigma}{K} \quad (2.1)$$

Här är  $Z$  det så kallade godhetstalet och  $\alpha$  Seebeck-koefficienten.  $\sigma$  betecknar elektriska ledningsförmågan och  $K$  den termiska ledningsförmågan. Anledningen till att temperaturen  $T$  återfinns både i vänster- och högerledet är för att få ett dimensionslöst tal. Med dimensionslösa tal kan diverse material jämföras och på sätt påvisas vilket material som ger största möjliga energigenerering ur den termoelektriska generatoren [3]. För att få ett högt  $ZT$ -värde finns det tre fysikaliska egenskaper som avgör. Det som eftersträvas är god elektrisk ledningsförmåga, låg termisk ledningsförmåga samt en hög Seebeck-effekt. Dessa egenskaper motverkar i många fall varandra och dagens utveckling syftar mestadels till att manipulera strukturen hos material för att få ut en optimal kombination av egenskaper. För att kunna arbeta med kristallstrukturen krävs val av lämpliga grundämnen. Tidigare har materialet

Vismut-Tellurid varit nästan ensamt på marknaden. Det består av relativt tunga grundämnen från högra halvan av periodiska systemet med en stor masskillnad mellan grundämnena. Tungt element får en lägre fononhastighet vilket bidrar till en sämre termisk ledningsförmåga. Fononhastighet är hastigheten på kristallstrukturens vibrationer. Material med mer komplicerade kristallstrukturer har samma effekt. Två olika grundämnen med stor skillnad i massa leder också till lägre termisk ledningsförmåga. Ämnen från högra halvan av periodiska systemet har en tillräckligt god elektrisk ledningsförmåga men ej för bra då detta medför en dålig Seebeck-effekt. Vismut-Tellurid uppfyller alltså samtliga av dessa egenskaper, men är endast stabil för lägre temperaturer [7].

På Chalmers Tekniska Högskola forskas det nu på att förändra kristallstrukturen hos material för att på så vis kunna sänka den termiska ledningsförmågan utan att försämra den elektriska. Ett material som Anders Palmqvists forskargrupp på Chalmers har utvecklat består av Barium, Gallium och Germanium [7]. Detta material har en komplicerad struktur som kallas klatratstruktur och leder värme som ett glas men elektricitet som en kristall. Förutom att påverka kristallstrukturen arbetar forskarna även med att skapa fler korngränser inom materialet. En annan metod är att introducera nanoinklusioner av olika material. På så sätt kan materialet manipuleras till högre godhetstal [7]. Även andra användningsområden än fordonsapplikationer undersöks på Chalmers, till exempel att applicera termoelektriska generatorer i kläder.

### 2.1.3 Ellära

En ledare är ett föremål som leder elektricitet. Strömmen i en ledning består av två samverkande komponenter – elektrisk ström och elektrisk spänning. Elektrisk ström kan definieras som en mängd elektroner som förflyttas i ledaren under en viss tid. Dess storhet betecknas med  $I$  och enheten betecknas med ett A, vilket står för Ampere. Elektrisk spänning,  $U$  kan definieras som den kraft som elektronerna skjuts med i ledningen och anges i enheten Volt, V. Med ström och spänning givet kan effekten i enheten Watt beräknas enligt effektlagen med ekvation 2.2 där  $R$  står för resistansen i enheten Ohm,  $\Omega$  [8].

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} \quad (2.2)$$

### 2.1.4 Användning av Peltierelement

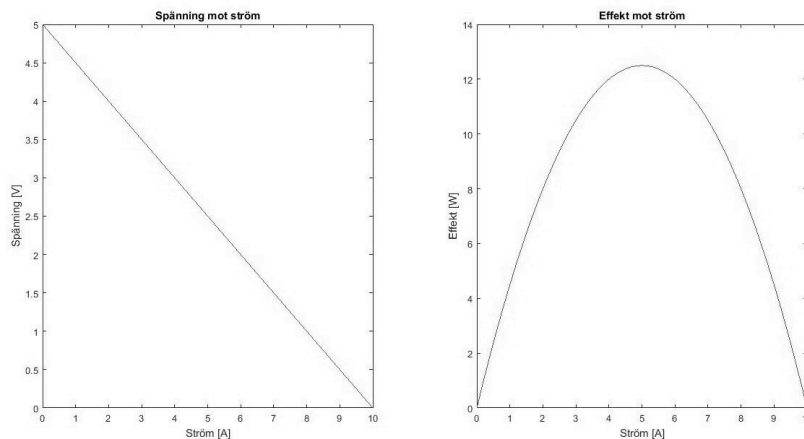
Det är av yttersta vikt att ha noggrann kunskap om den generatorn som används. Peltierelement fungerar på olika sätt och ett vanligt men felaktigt antagande är att energimängden skapad i generatorn alltid ökar med temperaturen. Istället är det så att varje generator har en egen optimal arbetstemperatur. En högre temperatur leder till en ökad resistivitet och således kan lägre effekt hämtas ut. Dock är det mer energi som finns att ta upp vid högre värme. Därför är det viktigt att anpassa sin generator så att detta klarar av och arbetar bäst vid den tänkta arbetstemperaturen [9].

### 2.1.5 Sammankoppling av Peltierelement

Eftersom dagens termoelektriska generatorer har en relativt låg verkningsgrad och genererar förhållandevis lite effekt är det ofta aktuellt att använda flera generatorer. För att kunna utvinna maximal effekt ifrån sina varma och kalla ytor brukar flera generatorer således sammankopplas. Detta görs i huvudsak på två sätt, seriekoppling eller parallellkoppling. De två olika principerna har skilda fördelar. Vid seriekoppling går samma ström genom alla generatorer medan spänningarna adderas. Vid parallellkoppling blir det tvärt om, spänningen ligger konstant över samtliga generatorer och alstrar en adderad ström. Således beror val av sammankopplingsmetod på om mer ström eller spänning efterfrågas. Under ideala förhållanden bör effekten som alstras vara densamma vid serie- och parallellkoppling [9].

Att sammankoppla termoelektriska generatorer har dock sina svårigheter. Då två sammankopplade generatorer belastas med olika temperaturdifferens kommer Peltiereffekten övergå till Seebeck-effekt i den generatormed lägre temperaturdifferens. Då effekten som alstras i den första generatormed går igenom den andra så kommer den påtvinga en ändring i temperaturdifferensen istället för att den andra generatormed bidrar till att alstra mer effekt. Det är därför viktigt vid sammankoppling av Peltierelement att båda generatorerna har samma temperaturer på den varma sidan och på den kalla sidan. I fall båda generatorerna inte har samma temperaturer kan effektgenereringen bli lägre i de fall då två generatorer används.

För att kunna uppnå högsta möjliga genererad effekt är det viktigt att använda rätt resistans. Ström och spänning är linjärt beroende. Detta illustreras även i vänstra bilden i figur 2.2. Däremot är effekten beroende av strömmen i form av en andragskurva, vilket illustreras i högra bilden i figur 2.2. En tumregel kan således fastslås att motståndet bör vara tillräckligt stort att det anpassar spänningen över generatorerna till hälften av det maximalt möjliga. För att kunna ta reda på den optimala resistansen över Peltierelementet så krävs kännedom om generatormens inre resistans. Denna är starkt temperaturberoende och kan i många fall vara komplex att ta fram [9].



Figur 2.2 – Spänning mot Ström och effekt mot ström hos ett Peltierelement.

## 2.2 Förbränningsmotor

Med en förbränningsmotor omvandlas kemiskt bunden energi till arbete. Samtliga förbränningsmotorer har en viss verkningsgrad och medför förluster, bland annat i form av värme. Ju högre verkningsgrad, desto mindre förluster [10].

### 2.2.1 Från bränsle till arbete

Motorn i ett fordon agerar systemets energikälla och spelar således en avgörande roll för bilens totala prestanda. I en förbränningsmotor omvandlas den bundna kemiska energi, som återfinns i bränslekällan, till mekaniskt arbete. Omvandlingen sker genom oxidation, vilket innebär att bränslet antänds i motorns cylindrar då det får reagera med luft. Antändningen medför temperatur- och tryckhöjningar, och skapar ett övertryck inuti cylindern. Kraften som uppkommer i expansionen sätter mekaniska förbindelser i motorn i rörelse och ger upphov till en roterande vevaxel. Axeln är i sin tur bunden till ytterligare komponenter som med kraftöverföring sätter fordonet i rörelse [10].

### 2.2.2 Förbrukningsvärde

För en personbil av standardstorlek ges tabelldata för medelhastighet, bränsleförbrukning, avgasflöde och avgastemperatur i tabell 2.1. Dessa värden gäller för körning i tre olika miljöer: stad, landsväg och motorväg (E6) [11].

### 2.2.3 Avgassystem

Efter att bränslet har förbränts i motorn släpps gaserna ut i avgassystemet. Avgaserna är varma och trycket är högt precis efter cylindern vilket gör att de börjar strömma ut ur avgasröret. Avgassystemet har som uppgift att dämpa ljud, efterbehandla avgaserna med katalysatorn och leda ut dem ur bilen på ett lämpligt ställe. Efterbehandlingen i katalysatorn är till för att minska avgasernas inverkan på miljön. Alla bilsbilar som har sålts i Sverige efter 1989 har enligt lag en katalysator [12]. En katalytisk effekt är när reaktionshastigheten ökar vid närvaron av en katalysator. Nya reaktionsvägar öppnas tack vare materialet i katalysatorn vilket gör att reaktionen kan ske med lägre aktiveringsenergi [13]. Som det framgår i figur 2.3 är det nödvändigt att låta avgaserna komma i kontakt med stora ytor för att påskynda katalys. Många små trånga gångar i kupan gör att det blir ett stort tryckfall över katalysatorn [14]. Problemet med katalysatorer är att de måste vara varma för att ha en katalytisk effekt på avgaserna. För att kunna minska utsläppen av farliga avgaser förväms därför många katalysatorer vid kallstarter och stadskörning. För att en katalysator ska fungera är det viktigt att temperaturen är hög nog för att den katalytiska effekten ska träda i kraft [2]. Den övre temperaturgränsen är materialberoende och bestäms av katalysatormaterialets termiska specifikationer.

Tabell 2.1 - Datavärden för en personbil av standardstorlek

Körmiljö	Medelhastighet [km/h]	Bränsleförbrukning [l/10mil]	Avgasflöde [g/s]	Avgas-temperatur [°C]
Stad	19	11,5	10	700
Landsväg	62,6	8	20	670
Motorväg (E6)	110	9,8	40	790



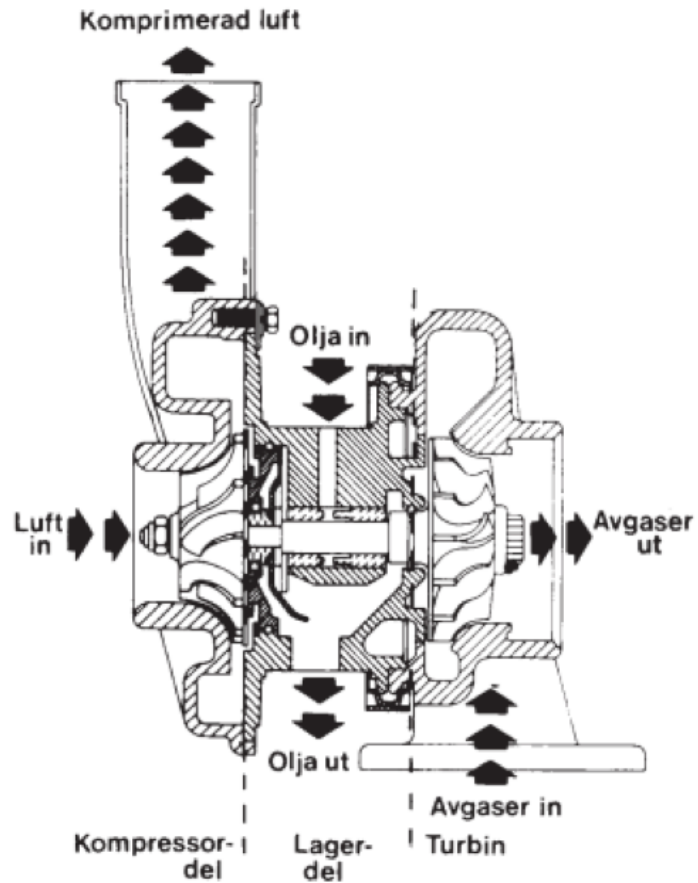
Figur 2.3 - Illustration av en katalysator där kväveoxiderna flödar in och ut kommer kvävgas [15].

För att minska motorljudet dämpas vibrationerna från avgaserna i en ljuddämpare. För att reducera ljudvibrationerna minskas hastigheten på gasen och ljudvågorna absorberas med omgivningen [16]. Diffusion och absorption sker genom olika geometriändringar. Eftersom en ljuddämpare är uppbyggd med många krökar och dimensionsändringar sker det stora tryckförluster över dem [14].

En motor kan även vara turbomatad. Turboaggregat kan grovt delas in i tre delar: kompressordel, lagerdel och turbin, se figur 2.4. Kompressordelen har till uppgift att komprimera ihop gasen, vilket leder till ett övertryck i cylindrarna. En turboladdad motor får därmed oftast en högre effekt eftersom den kan fyllas med betydligt mer gas än en vanlig sugmotor [17].

En sugmotor fungerar på så sätt att den öppnar upp insugventilerna och atmosfärstrycket hjälper till att pressa in blandningen av luft och bränsle. Detta innebär att ingen yttre källa i form av turbo eller kompressor bidrar i insugsfasen. Eftersom att det finns ett visst motstånd i inloppskanalerna samt den korta tiden som ventilerna är öppna, kommer trycket i cylindrarna endast upp till approximativt 80 % av atmosfärstrycket. Med turboladdning hjälper en kompressor till att trycka in luftbränsleblandningen till cylindrarna. Detta kan resultera i värden på trycket som är ungefär 200 % av atmosfärstrycket [17].

Temperaturskillnaden på avgaserna i en sugmotor jämfört med en turboladdadmotor är försumbar. Däremot blir flödet hos avgaserna högre i en turboladdadmotor vilket i sin tur leder till högre värmeöverföringskoefficient. Följaktligen blir avgasrören varmare i en turboladdadmotor jämfört med en sugmotor. I tabell 2.2 och 2.3 följer exempelvärden på flöde och temperatur hos avgaserna efter katalysator för turboladdade motorer [18].



Figur 2.4. - Illustration av ett turboaggregat med kompressordel, lagerdel och turbin [17].

Tabell 2.2- Temperatur och massflöde för avgaserna i en bensindriven personbil vid maximal last [18].

Bensin		
Massflöde [kg/h]	Temperatur in [°C]	Temperatur ut [°C]
720	850	700

Tabell 2.3 - Temperatur och massflöde för avgaserna i en dieseldriven personbil vid maximal last [18].

Diesel		
Massflöde [kg/h]	Temperatur in [°C]	Temperatur ut [°C]
630	650	400

## 2.2.4 Kylning av avgaser

Eftersom en förbränningsmotor har en begränsad verkningsgrad kan inte all värmeenergi som produceras omvandlas till mekanisk energi. Således medför detta att överskottsvärmen måste ledas bort från motorn för att motverka överhettning. Kylningen utgörs huvudsakligen av vatten eller luft. Bilar som tillverkas idag har vattenkylning som kylmedium på grund av att dagens fordonsmotor oftast har en högre effekt [19].

För exempelvis mopeder och gräsklippare som drivs av mindre förbränningsmotorer används endast kylflänsar. För att kunna kyla en bilmotor i en stationär bil med flänsar, krävs applicering av en fläkt som hjälper luften att forcera förbi kylflänsarna. Detta beror på att radiatoren kräver ett regelbundet luftflöde för att kylningen ska verka. I de fall där bilen är i rörelse erhålls regelbundet flöde naturligt, vilket resulterar i att fläkten ej är nödvändig. Fläkten styrs av sensorer som talar om huruvida den behövs vara på eller av beroende på vilken temperatur motorn har. Luft kan vara ett sämre kylmedium än vatten. Däremot har gasen lägre densitet och större mängd luft än vätska kan därför tillföras för att transportera bort värmen. Fördelen med att kyla med luft är framförallt att det oftast är billigare att tillverka luftkylningssystem. Dessutom fås i många fall en lägre vikt på systemet. Luftkylning medför även vissa nackdelar, bland annat ökad bränsleförbrukning eftersom ojämnare temperatur i motorn erhålls. Dessutom tillverkas allt fler bilar med högre effekt relativt sin storlek, vilket leder till att luftkylning kan vara otillräcklig. I en vattenkyld bil kan i vissa fall självcirkulering av vätskan erhållas tack vare konvektion. Det innebär att ingen yttre fläkt behöver användas som i fallet med luft. Dock är applicering av en pump att föredra för cirkuleringen då det kan ge en effektivare värmeöverföring [19].

## 2.2.5 Mottryckets betydelse

I studien ”*Fuel Efficient Exhaust Systems*” [4] har det undersökts hur mottrycket påverkas då vissa specifika faktorer är kända. I detta fall definieras mottryck som det statiska trycket i avgasröret, när det i fullt utvecklad strömning befinner sig strax efter motorn. Givet medelhastighet, bränsleförbrukning vid en viss typ av körning för ett fordon samt energimängd i bränslet, kan det beräknas hur mycket effektförlusten i motorn blir till följd av mottrycket [4]. Matematisk enhetsanalys ger ekvationerna 2.3-2.5 som beräknar effektförlusterna. Givet medelhastighet och bränsleförbrukning för ett fordon kan volymflödet med vilket bränslet förbrukas beräknas enligt ekvation 2.3.

$$\dot{V}_{\text{bränsle}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \text{Bränsleförbrukning} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \cdot \text{medelhastighet} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (2.3)$$

Då volymflödet för bränslets förbrukning har beräknats kan bränsleeffekten kalkyleras enligt ekvation 2.4.

$$\text{Bränsleeffekt} [W] = \dot{V}_{\text{bränsle}} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \cdot \rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{Effektivt värmevärde} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (2.4)$$

Givet bränsleeffekt kan slutligen förlusterna beräknas enligt ekvation 2.5.

$$\text{Förlust} = \text{Bränsleeffekt} \cdot 0,005 \text{ tumHg}^{-1} \quad (2.5)$$

Denna studie har genomförts för olika tryck vid olika varvtal på motorn samt olika belastning. Bakgrunden är de ökande bränslekostnaderna och att finna nya sätt att minska förbrukningen. Det kan vara svårt att vara exakt i mätningarna då krökar i rör och liknande påverkar flödet. Det maximala mottrycket definieras som det maximalt tillåtna ifrån motortillverkarna medan det lägsta är hur mycket själva avgasröret ger utan ljuddämpare [4].

Tester som genomförts i samma studie på dieselmotorer har givit att vid ett tryckfall på 1 tum Hg (133 Pa) ökar bränsleförbrukningen i motorn med 1 % för vanlig insprutning och 0,5 % för en turbodrivna. Dessa tester gjordes om för olika lastcykler samt tryck och det visade sig att skillnad i last och varvtal ej påverkar nämnvärt. Dessutom har det visat sig att nästan oberoende av last och varvtal ökar bränsleförbrukningen med 1,5 % mellan lägsta och högsta mottrycket. För att verifiera detta genomfördes sedan tester på två lastbilar som körde en sträcka med och utan en tryckhöjare, i form av en kompressor vid avgasröret. Skillnaden i mottryck gick från 0,5 till 2,8 respektive 3,0 tum Hg och bränsleförbrukningsskillnaden var på 2,4 % [4]. Det diskuterades hur avgassystemet bör konstrueras för att minska mottrycket. I de fall där ljuddämpning ej behöver tas i beaktning är det gynnsamt att använda sig av vertikala avgassystem istället för horisontella. Fördelen är att lägre mottryck lättare kan erhållas [4].

## 2.3 Strömningsmekanik

Uppförandet för ett avgassystem beskrivs till största del av strömningsmekanik. Då en fluid flödar igenom ett rör kommer den uppvisa ett visst beteende. Beteendet ligger till grund för hur bland annat termodynamiska storheter förändras vilket i sin tur påverkar värmeöverföring och krafter mellan fluiden och dess omgivning [14, 20].

Då fluider flödar mot ytor bildas hastighetsgränsskikt. Hastigheten är högre längre bort från ytan i gränsskikten. I figur 2.5 framgår det hur gränsskikten från under- och ovasida sammanfaller i mitten. Detta resulterar i att fluidens hastighet når sitt maximala värde i mitten av röret. Denna punkt har markerats med  $v_{max}$  i figur 2.5. Om ett rör har krökar kommer den maximala hastigheten att förskjutas i någon riktning. I de fall där fluiden har en annan temperatur än ytan bildas även ett temperaturgränsskikt. Det som driver en fluid genom ett rörsystem är tryckskillnader mellan olika områden i röret. Ju längre och komplexare ett rörsystem är desto större tryckfall erhålls, vilket även måste beaktas i fordonstillämpningar. Tryckfallet är dessutom är beroende av fluidens flöde i ett rör, ju högre flöde desto högre tryckfall fås. Eftersom det är motorns kolvar som skapar tryckförändringar som driver avgaserna, är det av intresse att möjliggöra en enkel väg för att driva ut avgaserna ur avgassystemet. På så sätt minimeras inte bara det arbete kolvarna utför, utan även tryckfallet reduceras [14].

Då en fluid strömmar i rör kan strömningen vara laminärt eller turbulent beroende på fluidens densitet, hastighet, viskositet och rörets diameter. I praktiken kan laminär strömning jämföras med en ordnad genomskinlig stråle ur en vattenkran. Ökas trycket i kranen uppstår istället en vit och oordnad stråle, detta kallas turbulent strömning. För att i teorin identifiera om en fluid är laminär eller turbulent används begreppet Reynoldstal som ges av ekvation 2.6 [14].

$$Re_d = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (2.6)$$

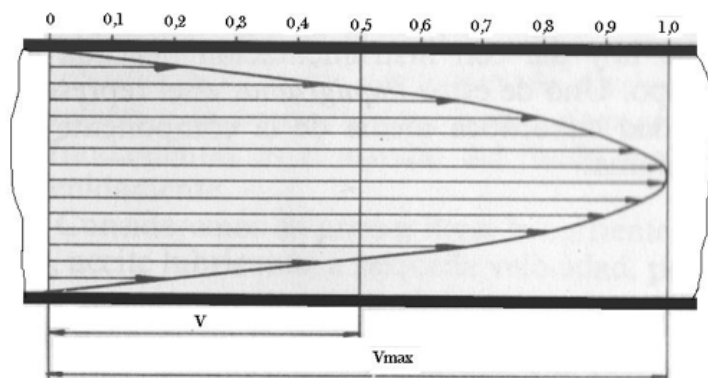
Här betecknar  $\rho$  fluidens densitet och  $d$  är rörets diameter. Fluidens hastighet är  $v$  och den dynamiska viskositeten antydes med  $\mu$ . De värden som ger laminärt och turbulent flöde visas i tabell 2.4 [14]. Ett annat begrepp som är viktigt att känna till är fullt utbildad strömning, som kan gälla både för laminärt och turbulent flöde. Detta uppkommer då den främre delen av strömmen är likformig och konstant, vilket inträffar när en fluid har stabiliserat sig kring ett specifikt Reynoldstal. Fullt utbildad strömning kan antas ske efter en viss längd på röret ( $L$ ), beroende på rörets diameter samt Reynoldstalet. Den rörlängd som krävs för fullt utbildad strömning ges för det laminära och det turbulenta flödet av ekvation 2,7 respektive 2,8 [14].

*Laminärt:*  $L = 0,06 \cdot Re_d \cdot d$  (2.7)

*Turbulent:*  $L = 1,6 \cdot Re_d^{\frac{1}{4}} \cdot d$  (2.8)

Tabell 2.4 - Reynoldstal för laminärt och turbulent flöde i rör.

Reynoldstal	Flöde
$Re_d < 2300$	Laminärt
$Re_d \geq 2300$	Turbulent



Figur 2.5. Strömningsprofil i rör där den maximala hastigheten har betecknats med  $v_{max}$

## 2.4 Värmeöverföring

Värmeöverföring uppkommer då det finns en temperaturskillnad mellan två medium. Värme överförs genom konvektion, ledning och strålning. Hur mycket värmeeffekt som överförs beror på temperaturskillnaden mellan fluiderna, dess egenskaper och rörelse samt den mellanliggande ytans egenskaper. Värmeeffekt betecknas  $Q$  och är angiven i enheten Watt. Formeln för att räkna ut värmeeffekt ges av ekvation 2.9 [20].

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

Här är  $A$  arean på ytan där värmeöverföringen sker.  $\Delta T$  är temperaturskillnaden mellan ytans olika sidor och  $U$  är värmeöverföringskoefficienten och anges i  $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ . Värmeöverföringskoefficienten beräknas i sin tur med ekvation 2.10 [20].

$$U = \frac{1}{R_{tot}} \quad (2.10)$$

Här är  $R_{tot}$  är den totala termiska resistansen. Termisk resistans är ett mått på hur svårt det är för värme att överföras mellan två punkter och beror av värmeöverföringsmekanismerna ledning, konvektion och strålning [20].

### 2.4.1 Ledning

Ledning är värmeöverföring genom en fast yta. Värmeeffekten  $Q$  bestäms med hjälp av Fouriers lag. För en plan platta med tjockleken  $d$  och tvärsnittsarean  $A$ , beräknas den med ekvation 2.11 [20].

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \quad (2.11)$$

Här betecknar  $k$  värmeledningskoefficienten i  $\text{W/mK}$  och är materialspecifik. Hur bra ledning som erhålls beror på material samt sträckan som värmen transporteras. För ledning i cirkulära rör ges den termiska resistansen av ekvation 2.12 [19]. I ekvationen betecknar  $r_2$  rörets yttre radie och  $r_1$  är den inre radien.

$$R_{led} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot r_2}{2 \cdot k} \quad (2.12)$$

Då värme transporteras mellan två fluider som är avskilda av en fast yta finns det olika faktorer som påverkar hur mycket energi som transporteras. Konvektionen på vardera sidan av den fasta yta och ledningen genom materialet bestämmer hur god värmeöverföring som erhålls [20]. Mer om konvektion återges i kapitel 2.4.2. Det är även av intresse att studera hur olika material påverkar värmeöverföringsförmågan. Tabell 2.5 [20] visar termofysikaliska egenskaper för aluminium, mässing och rostfritt stål. De egenskaper som återges är smältpunkt, termisk ledning samt densitet.

Tabell 2.5 - Termofysikaliska egenskaper för aluminium, mässing och rostfritt stål.

Material	Smältpunkt [°C]	Värmeledningskoefficient [W/mK]	Densitet [kgm <sup>-3</sup> ]
Aluminium	660	202	2719
Mässing	940	109	8500
Rostfritt stål	1600	16	8030

## 2.4.2 Konvektion

Värmeöverföring genom konvektion uppkommer av rörelser i gaser och vätskor. Det finns naturlig och påtvingad konvektion. Naturlig konvektion uppstår då fluiden sätts i rörelse på grund av densitetskillnader till följd av temperaturskillnader. Påtvingad konvektion är när fluidens rörelse beror på en pump eller fläkt. Konvektion beror på geometri, Prandtltalet och Reynoldstalet. Prandtltalet beskriver fluidens egenskaper och finns tabellerad för de vanligaste fluiderna i boken *"Heat and Mass Transfer"* [19]. Hastigheten i röret fås av massflödet genom röret, genomströmningsarean samt fluidens densitet enligt ekvation 2.13 [20].

$$v_{fluid} = \frac{\dot{m}}{A_{in} \cdot \rho_{fluid}} \quad (2.13)$$

Reynoldstalet används för att sedan beräkna den termiska resistansen. För att beräkna detta motstånd krävs Nusselts tal som för insidan av ett rör beräknas med ekvation 2.14. Med ekvation 2.15 evalueras sedan konvektionskonstanten  $h$ , som i ekvation 2.16 används för beräkning av den termiska resistansen [20].

$$Nu_D = 0.023 \cdot Re_D^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{0.3} \quad (2.14)$$

$$Nu_D = \frac{h_{in} \cdot d}{k} \rightarrow h_{in} = \frac{Nu_D \cdot k}{d} \quad (2.15)$$

$$R_{konv_{in}} = \frac{1}{h_{in}} \quad (2.16)$$

På utsidan av röret strömmar fluiden längs med röret vilket gör att röret antas vara en plan platta. Därför används ekvation 2.17-2.20 för att beräkna den termiska resistansen för konvektion på utsidan av röret.

$$Nu_x = 0.0296 \cdot Re_x^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2.17)$$

$$Nu_x = \frac{h_{ut} \cdot x}{k} \rightarrow h_{ut} = \frac{Nu_x \cdot k}{x} \quad (2.18)$$

Här är  $x$  den karakteristiska längden för geometrin fluiden strömmar över. Konvektionskonstanten används för att beräkna den totala termiska resistansen för insidan, utsidan och genom röret som för att få en total resistans enligt ekvation 2.19.

$$R_{konvut} = \frac{1}{h} \quad (2.19)$$

$R_{tot}$  kan sedan sättas in i ekvation 2.10 för att beräkna  $U$  som används i ekvation 2.9 för att få ut värmeeffekten.  $R_{led}$  beräknas med ekvation 2.12 enligt tidigare [20].

$$R_{tot} = \left(\frac{1}{h_{in}}\right) + R_{led} + \left(\frac{1}{h_{ut}}\right) \quad (2.20)$$

### 2.4.3 Värmeöverföring och effektpåverkan

I studien ”*The Potential for Thermo-Electric Devices in Passenger Vehicle Applications*” [21] har det undersökts hur värmeöverföringen för termoelektriska generatorn ändras med ändrad kylningstemperatur. Studien visade att värmeöverföringsförmågan minskade med ökad kylningstemperatur. Därför bör temperaturen för kylmedlet hållas så lågt som möjligt för att erhålla bäst möjliga värmeöverföring. Genom att sänka kylningstemperaturen med 1 °C kunde effekten höjas med 27 W. En ökad värmeöverföringsförmåga kunde även fås då flödet för kylmediet ökade [21].

För att undersöka effektgenerering har det i samma studie undersökts hur motorns varvtal och last påverkar de termoelektriska generatorernas arbete. En fenförsedd värmeväxlare i rostfritt stål användes i modellen. I försöket placerades värmeväxlaren ungefär 2 m från turbon på det dieseldrivna fordonet. Värmeväxlaren som användes möjliggjorde applicering av 16 stycken HZ-14 termoelektriska generatorer. Varje generator hade förmågan att generera 13 W vid en temperaturskillnad motsvarande 230 °C på den varma sidan av generatorn och 30 °C på den kalla sidan. Höljen med kylande medel applicerades på de sidor av generatorn som var fria för att öka temperaturskillnaden längs dessa. Dessutom användes keramiska komponenter mellan värmeväxlarna och de termoelektriska modulerna för att förhindra elektrisk förbindelse mellan dessa. För att förbättra värmeöverföringen användes kylpasta på samtliga ytor. För att möjliggöra temperaturmätning användes termiska metalltrådar av olika material som elektriskt förenats. De faktorer som mättes var massflöde hos luft och bränsle samt avgastemperaturerna, innan och efter den termoelektriska generatorn. På så sätt kunde den termiska energin som fanns tillgänglig hos de termoelektriska modulerna beräknas. För att undersöka den termoelektriska generatorns prestanda, kördes motorn på olika varvtal och laster. Varvtalen växlade i ett intervall från 2000 varv/minut till 3500 varv/minut. Lasterna varierade från 50 Nm till 200 Nm. För att minska mätfel fick temperaturerna ställa in sig innan mätning genomfördes. Den maximala effekten som genererades var 68 W. Detta erhöles vid 3500 varv/minut och en last på 200 Nm [21].

## 2.4.4 Flänsar

Principen för kylflänsar är att förstora arean för att öka konvektionens inverkan. Värmen fördelas på en yta som kyls med en fluid. Aluminium är det material som är mest förekommande för applikationer med kylflänsar. Fördelen är att materialet har både relativt god värmeledningsförmåga och låg densitet. En annan vanlig metall som används är koppar som har en ännu bättre värmeledningsförmåga men högre densitet [20].

Flänsar är ett sätt att förbättra den konvektiva värmeöverföringen. Fördelen är att ytorna blir större vilket gör att konvektionen får en större inverkan. För att mäta hur mycket mer energi som transporteras med flänsar används termen flänseffektivitet  $\varepsilon$ . Flänseffektiviteten är en kvot mellan hur mycket energi som transporteras med flänsar och hur mycket som skulle transporteras utan. Vid beräkningar för flänseffektivitet kan konvektionskonstanten antas lika över hela flänsen. Med ekvation 2.21 beräknas flänseffektivitet [20].

$$\varepsilon = \frac{q_f}{h \cdot A_{c,bas} \cdot \theta_{bas}} \quad (2.21)$$

$A_{c,bas}$  är arean flänsen täcker och  $\theta_{bas}$  är temperaturskillnaden mellan fluiden och flänsens bas enligt ekvation 2.21. Hur mycket energi som går genom flänsarna betecknas med  $q_f$  och kan beräknas med ekvation 2.22 (*Heat and Mass Transfer* (sida 161 table 3.4) [20]).

$$q_f = \Lambda \cdot \frac{\sinh(\lambda \cdot L) + \left(\frac{h}{\lambda \cdot k}\right) \cdot \cosh(\lambda \cdot L)}{\cosh(\lambda \cdot L) + \left(\frac{h}{\lambda \cdot k}\right) \cdot \sinh(\lambda \cdot L)} \quad (2.22)$$

Där  $\lambda$  och  $\Lambda$  är konstanter givna av ekvation 2.23 och ekvation 2.24. Flänsens längd anges av  $L$ .

$$\lambda = \sqrt{\frac{h \cdot P}{k \cdot A_c}} \quad (2.23)$$

$$\Lambda = \theta_{bas} \sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_c} \quad (2.24)$$

Omkretsen på flänsens toppyta betecknas med  $P$  och  $A_c$  arean för samma yta. Temperaturskillnaden  $\theta_b$  ges därefter av ekvation 2.25

$$\theta_{bas} = T_{bas} - T_{inf} \quad (2.25)$$

För att beräkna hur mycket energi som sedan kan transporteras genom röret används flänseffektiviteten i ekvation 2.26 för att beräkna den nya termiska resistansen. Denna resistans kommer vara lägre än i de fall där flänsar ej används och kan användas för att sedan beräkna den nya värmeöverföringskoefficienten. Här är  $R_{bas}$  är den termiska resistansen då flänsar ej används och  $R_f$  det termiska motståndet för flänsar används [20].

$$\varepsilon_f = \frac{R_{bas}}{R_f} \quad (2.26)$$

Det bör även tas till hänsyn hur mycket luftmotstånd varje fläns ger upphov till. Denna kraft kallas  $F_D$  och ges av ekvation 2.27 [14]. För beräkningar av flänsars påverkan på luftmotståndet hos fordon se Appendix B2.

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad (2.27)$$

Här är  $C_D$  är luftmotståndskoefficienten och beräknas både för framsidan och sidan av flänsen, eftersom de båda ger upphov till ett ökat motstånd. Fluidens densitet är  $\rho$ ,  $v$  är relativa hastigheten mellan flänsen och fluiden och  $A$  är flänsens tvärsnittsarea. Beräkning av  $C_D$  för sidan av flänsen ges av ekvation 2.28 [14].

$$C_{D-sida} = \frac{0,031}{Re_L^{1/7}} \quad (2.28)$$

Notera att Reynoldstalet nu är beroende av flänsens längd istället för diametern som i fallet för strömning i rör. Övriga variabler i ekvationen för beräkning av Reynoldstalet ges på samma sätt som i ekvation 2.5. För framsidan av en fläns, det vill säga en plan yta, beräknas  $C_D$  enligt ekvation 2.29 [14].

$$C_{D-fram} = 2,0 \quad (2.29)$$

Med givna värden på hastighet, storlek på fläns och Reynoldstal kan det totala luftmotståndet sedan räknas ut med ekvation 2.30.

$$F_{total} = \left( (C_{D-sida} \cdot A_{sida}) + (C_{D-fram} \cdot A_{fram}) \right) \cdot \frac{1}{2} \rho (v \cdot 1,3)^2 \quad (2.30)$$

Slutligen kan effektförlusten beräknas med hjälp den totala kraften och med samma relativhastighet som i ekvation 2.27, enligt ekvation 2.31.

$$P = F_{total} \cdot v \quad (2.31)$$

### 2.4.5 Termoelektrisk generering och bränsleförbrukning

I studien ”*Current Possibilities of Thermoelectric Technology Relative To Fuel Economy*” [22] har det undersökts hur termoelektriska generatorer påverkar den totala energiförbrukningen för en 2-liters bensinmotor. Generatoren utgjordes av idag kommersiella material och i studien gjordes tester på fyra förhållanden ”*US driving cycles (LA4, SC03, HWY, US06)*”. Som det tidigare har nämnts, behöver bilens katalysator en viss arbetstemperatur för att möjliggöra reduktion av miljöfarliga emissioner. Med avseende på detta placerades generatorerna efter katalysatorn i studiens genomförande. De temperaturer och massflöden som användes på avgaserna var 500 °C samt 10 g/s. I systemet användes vattenkylning, där dess temperatur och massflöde uppgick till 90 °C respektive 31 g/s [22].

Resultatet visade att antal generatorer och flänsarnas utformning är av stort intresse för utfallet av studien. Ju fler generatorer som applicerades desto högre resistans erhöles. Å andra sidan gav för få generatorer otillräcklig energiabsorbans. På samma sätt är optimal utformning av flänsar avgörande. Det ideala antalet flänsar resulterade i optimal värmeöverföring till generatorerna. Ett för stort antal flänsar gav istället för högt tryckfall, reducerad motoreffekt och gav högre bränsleförbrukning. Slutligen resulterade snabbare hastigheter i ökat tryckfall. En sammanställning av resultaten för de olika körmiljöerna framgår i tabell 2.6. Det visade sig alltså att termoelektriska generatorer har en positiv effekt på både utsläpp av koldioxid och minskad total bränsleförbrukning. Dock är den positiva effekten relativt liten. Därför har det spekulerats kring det faktum att det krävs förbättringar för att utnyttja teknologin kommersiellt [22].

*Tabell 2.6 - Resultat för de fyra kör cyklerna. LA4: Stadskörning, lättkörning. HWY: Ekonomisk Motorvägskörning. SC03: Aggressiv körning, stora hastighetsförändringar. US06: Körning med användning av luftkonditionering.*

<b>Kör cykel</b>	<b>Förbättrad bränsleförbrukning [%]</b>	<b>Minskat koldioxidutsläpp per km [g/km]</b>
LA4	0,13	0,2
HWY	0,36	0,42
SC03	0,15	0,24
US06	0,08	0,14

## 3 Metod

Detta kapitel kommer behandla både de teoretiska och praktiska tillvägagångssätten för framtagning av koncept och resultat. Under samtliga försök appliceras den termoelektriska generatoren direkt efter katalysatorn. Detta eftersom inget bör placeras innan katalysatorn och således är den hösta möjliga temperaturen att applicera generatoren på direkt efter katalysatorn [2]. För att ta fram ett optimalt rörkoncept genomfördes en konceptgenerering där idéer kring form och funktion togs fram med hjälp av brainstorming. Se Appendix D för samtliga genererade modeller. Dessa modeller har sedan lagt grund för teoretiska försök i form av simuleringar i olika datorprogram. I simuleringarna har det bland annat undersökts hur flänsar och krökar påverkar mottryck och effekt. Samtidigt som teoretiska försök bedrivits, har även experiment genomförts. Detta för att verifiera genomförda simuleringar och beräkna maximal effekt som kan erhållas från Peltierelementet. Peltierelementets tekniska specifikationer kan ses i Appendix G.

### 3.1 Simuleringar i CFD

*CFD* står för *Computational fluid dynamics* och omfattar beräkning av strömningsdynamik där numeriska metoder används för att analysera strömningsproblem. Under projektet användes programvarorna *ANSYS ICEM CFD*, *Fluent* och *EnSight* för att beräkna och simulera flöden i de rörkoncept som genererats. *ICEM CFD* är en programvara där geometrier byggs upp för att sedan delas in i finita element. Geometrierna exporteras sedan till *Fluent* för ansättning av randvillkor. Därefter löses problemen med hjälp av *FVM (Finita Volym Metoden)* och ett resultat för strömningsdynamiken erhålls. För tredimensionella fall kan simulerad data föras in i programvaran *EnSight* för visualisering och analys. De randvillkor som sattes för simulering av det slutliga konceptet presenteras i faktaruta 3.1. Avgasernas temperatur och hastighet baseras på data som visas i tabell 2.1, 2.2 och 2.3.

För att undersöka hur flänsar påverkar värmeöverföringen i förhållande till hur dessa påverkar mottrycket testades olika former av flänsar. En simulering av en ledskena inne i röret genomfördes för att undersöka hur denna påverkade luftflödet. Således kunde det utredas var den största potentiella energin fanns. Begynnelsevillkoren sattes upp enligt faktaruta 3.1 för att efterlikna avgasflödet vid landsvägskörning. Simuleringarna för tryckfallets påverkan genomfördes dock för samtliga körmiljöer.

*Faktaruta 3.1 – randvillkor för simulering av slutligt koncept i CFD*

Rör: kvadratisk med arean 5x5 cm och en temperatur på 300 K Avgasernas temperatur och hastighet vid inflödet: 1000 K och 30 m/s
--

## 3.2 Experiment

För experimenten svetsades ett cirkulärt stålrör ihop med ett kvadratisk rör. Det cirkulära rörets innerdiameter var 34 mm och 300 mm långt. Det kvadratiske rörets sidor var 30 mm och även det 300 mm långt. Anledningen till dimensionerna på rören var att efterlikna förhållande i avgassystemet på en vanlig personbil. En varmluftspistol användes för att efterlikna avgaserna. Den placerades så att den varma fluiden strömmar in i den cirkulära delen på röret. Varmluftspistolen har enligt tillverkarens specifikationer ett volymflöde på 550 l/min och en temperatur på 600 °C. Detta ger ett Reynoldstal motsvarande 5000, vilket enligt tabell 2.4 motsvarar turbulent flöde precis som i avgassystemet. En rörlängd på 300 mm var nödvändig för att det erhålla fullt utbildad strömning. En bild på prototypen finns i figur 4.7.

### 3.2.1 Värmeöverföring i rör

Syftet var att med termoelement mäta temperaturen på ytan av ett stålrör där ett Peltierelement senare ska placeras. Peltierelementet har en maxtemperatur på 250°C och därför var det viktigt att kunna hålla koll på vilken temperatur röret uppnår för att inte överhätta generatoren. Fluidens temperatur mättes för att få ett resultat på hur bra värmeöverföring det var från fluiden till utsidan av röret.

Stålröret bestående av en cirkulär del och en kvadratisk del placerades på två träbitar för att minimera värmeförluster i form av ledning. Ett termoelement användes för att mäta temperaturen på rörets yta. Det placerades på ovansidan av det kvadratiske röret, 10 mm efter svetsen, surrades fast med ståltråd och kopplades till en temperaturgivare. Änden på termoelementet täcktes med värmeledande pasta för att öka värmeledningsförmågan från röret till elementet. Ett tegelblock placerades ovanpå anslutningen för att isolera värme från att försvinna. Från det att varmluftspistolen startats togs mätpunkter var 30 sekund i 7 minuter.

För mätning av fluidens temperatur borrades ett hål i röret i samma höjd som vid mätningen av yttemperaturen. Hålets diameter var 0,1 mm större än spetsen på termoelementet. Termoelementet fördes sedan in i hålet tills spetsen var placerad i mitten av röret. Här togs mätpunkter var 10 sekund eftersom en snabbare förändring skedde.

### 3.2.2 Maximal effekt ur ett Peltierelement

Laborationen inleddes med att smörja kylpasta på den sida av Peltierelementet som tar upp värme. Därefter placerades Peltierelementet på ovansidan av det kvadratiske röret, 10 mm efter svetsen. Kylflänsen placerades sedan ovanpå Peltierelementet för att förbättra kylningen på dess ovansida. För att få en större temperaturdifferens kyldes flänsarna med tryckluft. Termoelement placerades på rörets utsida samt på flänsens bas för att kunna mäta temperaturdifferensen på Peltierelementet.

Först kopplades Peltierelementet till en multimeter utan någon extern resistans i kretsen och röret värmdes upp till 200°C. Spänningen i den öppna kretsen noterades. Sedan kopplades en ställbar resistans in i kretsen för att undersöka hur effekten påverkades. Röret värmdes upp till 200 °C och spänningen noterades. Detta upprepades med resistansen inställd på olika värden från 3 till 25 Ω. Effekten för varje datapunkt räknades sedan ut med spänningen och resistansen enligt ekvation 2.2 och plottades mot resistansen.

### 3.2.3 Effektens beroende av temperaturskillnaden

För att undersöka hur effekten hos Peltierelementet var beroende av temperaturskillnaden undersöktes hur effekten varierade då röret värmdes upp. Samtidigt kylde ovansidan av generatoren med flänsar och tryckluft. Utrustningen ställdes upp enligt försöket i kapitel 3.2.2. Till Peltierelementet kopplades en fast resistans på  $6,8 \Omega$ . I kretsen kopplades det även in en multimeter. Varmluftspistolen tilläts sedan värma upp röret och spänningen som uppstod i kretsen samt den varma och den kalla temperaturen antecknades. Effekten räknades sedan ut med spänningen och resistansen enligt ekvation 2.2 och plottades slutligen mot temperaturskillnaden mellan den varma och kalla sidan på generatoren.

### 3.2.4 Effekt med två Peltierelement

Utrustningen ställdes upp enligt kapitel 3.2.2. Dock placerades i detta försök två Peltierelement efter varandra vid början på den kvadratiske delen av röret. Fläkten kopplades in i kretsen tillsammans med en voltmeter parallellkopplat och en amperemeter i seriekoppling. Fläktens resistans mättes med en ohmmeter. Peltierelementen kopplades först i serie med varandra och sedan parallellt för att undersöka effektberoendet. För respektive uppställning mättes spänningen och strömstyrkan mot temperaturen. Effekten räknades sedan ut med ekvation 2.2.

## 3.3 Beräkningar av värmeöverföring

Beräkningar som behandlar värmeöverföring mellan fluid och Peltierelement har gjorts för att försäkra att tillräckligt med värme överförs till generatoren. Med beräkningar har det även undersökts vilken förtjänst på effekten applicering av flänsar på utsidan av röret hade gjort. Flänsarna kommer att placeras på avgasröret under bilen.

### 3.3.1 Värmeledning på insida och utsida

Konvektionen beräknades vid de tre olika körmiljöerna: stadskörning, landsvägskörning och motorvägskörning. Eftersom motorn jobbar olika mycket under de olika körtyperna blev temperaturen och hastigheten på avgaserna olika, vilket även påverkade konvektionen på insidan av röret. För konvektionen på insidan av röret beräknades först hastigheten på avgaserna med ekvation 2.13. Därefter beräknades Reynoldstalet med ekvation 2.6. Slutligen evaluerades konvektionskonstanten med ekvation 2.14 samt 2.15. En skillnad i värmeöverföring på utsidan av röret noterades vid de olika körmiljöerna. Hastigheten på luften under bilen är väldigt svår att bestämma och bilars aerodynamik är i sig ett eget forskningsområde. Olika metoder för att minska luftmotstånd och öka nedkraften (även kallat downforce) på bilen finns idag vilket påverkar flödet under bilen. Dock antogs det vara turbulent flöde över en plan platta och Reynoldstalet beräknades enligt tidigare. Därefter bestämdes konvektionskonstanten enligt ekvation 2.17 och 2.18. Då luft passerar under bilen kommer den att accelereras eftersom arean här är mindre. Därmed kommer relativa hastigheten mellan bilen och luften vara högre än mellan bilen och vägen. Hastigheten mellan luften under bilen och bilen antogs vara 30 % högre än hastigheten mellan bilen och vägen [23].

### 3.3.2 Energiflöde av flänsar

Flänsarnas storlek definierades med en bestämd bredd och längd medan höjden varierade. Bredden var 1 mm och längden 40 mm. Höjden varierade mellan 0-500 mm och stegrades med 1000 steg. Omgivande temperaturer hölls konstanta och sedan beräknades energiflödet för olika höjder på flänsen med ekvation 2.22. Temperaturerna var uppskattade till rimliga värden under rådande förhållande. Testerna gjordes för de tre olika körmiljöerna: stadskörning, landsvägskörning och motorvägskörning.

Eftersom flänsar har olika effektivitet beroende på konvektionskonstanten gjordes det även beräkningar där dimensionerna på flänsen var konstanta. Istället varierades konvektionskonstanten för att undersöka hur effektiviteten förändrades med ekvation 2.21. Reynoldstalen beräknades med ekvation 2.6, där  $d$  byts ut mot den karakteristiska längden. Den karakteristiska längden i detta fall är sträckan mellan början på plattan och punkten där Reynoldstalet söks. Under beräkningarna uppskattades längden till 2 m in under bilen från bilens front.

### 3.3.3 Luftmotstånd av flänsar

Beräkning av effektförlusten till följd av applicering av flänsar under bilen genomfördes för att säkerhetsställa att effektförlusterna inte blev större än den genererade effekten som fås ifrån Peltierelementet. Vid beräkningarna antogs varje fläns påverkas oberoende av flänsar runt omkring. Dessutom antogs flödet under bilen vara turbulent, med en hastighetsökning motsvarande 30 % gentemot bilens hastighet.

Enligt ekvationerna 2.27-2.31 genomfördes beräkningar i *MatLab* där flänsen var 1 mm bred. Höjden varierades mellan 10-100 mm och för varje ny höjd förändrades längden på flänsen mellan 10-400 mm. Beräkningarna kan ses i Appendix B3 där tabelldata har hämtats från Appendix C1.

### 3.3.4 Mottryck

För att veta hur mycket rörets geometri kan påverkas undersöktes hur stor effektförlust en ökning i mottryck medför. Beräkningarna genomfördes enligt ekvationerna 2.3-2.5 och beräknades för samtliga körmiljöer. Data är hämtad från Tabell 2.1 och C3 i Appendix. I resultatet eftersträvades att ta reda på förlusten i enheten W/Pa.

### 3.3.5 Materialets påverkan

För att undersöka materialets betydelse för den totala resistansen användes ekvationerna 2.12-2.20. Beräkningar genomfördes i *MatLab* där materialets värmeledningskoefficient varierades för att undersöka skillnad i energiflöde mellan olika material, se Appendix B1. Den totala resistansen användes sedan för att beräkna överföringskonstanten enligt ekvation 2.10. Den varierande överföringskoefficienten jämfördes sedan med värdet på värmeledningskoefficienten.

### 3.3.6 Optimal Flänshöjd

Genom att jämföra förlusterna av mottrycket och luftmotståndet med vinsterna i ökad värmeöverföring, som fås med flänsarna, kan en nettoeffekt tas ut. På detta vis kan flänsarnas nytta på systemet mätas. Förlusten av mottrycket i systemet antogs öka linjärt, vilket gör att förlusten för en ökad flänshöjd kan beräknas med ekvationerna 2.3-2.5 samt resultat av tryckförlust från simuleringar i *CFD*. Fullständiga beräkningar finns i Appendix B5.

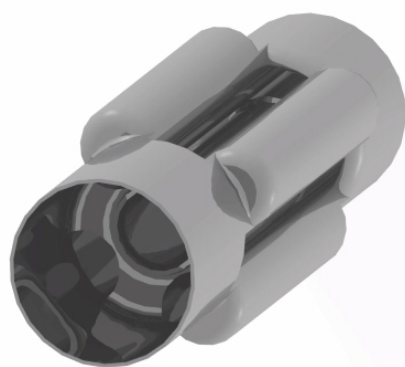
## 4 Resultat

Detta kapitel behandlar de resultat som erhållits i de försök som gjorts. Först presenteras resultat av simuleringar som gjorts och sedan följer resultaten från de experiment och beräkningar som utförts.

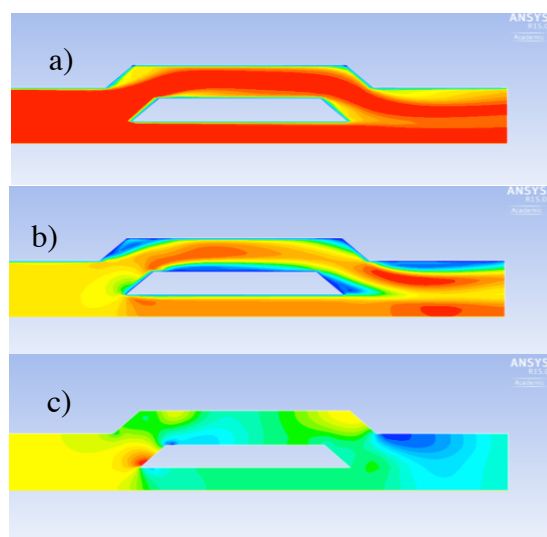
### 4.1 Simuleringar i CFD

För varje koncept genomfördes analyser i CFD genom att geometrierna byggdes upp och lösningar simulerades. Lösningarna delades upp i yttre och inre rörgeometrier, där de inre framförallt syftar till uppbyggnad med flänsar och riktningsskenor inuti röret. Figur 4.1 och figur 4.3 visar två exempel på koncept som analyserades i 2D.

Koncept som illustreras i figur 4.1 är tänkt som ett rör som delar upp sig i två eller fler rör med olika placering i rummet. Detta ska ge ökad flödesvariation samt ge möjlighet för någon sorts kylning mellan rören. Figur 4.2 illustrerar CFD simuleringen i 2D med avseende på temperatur, hastighet och tryck.



Figur 4.1 - CAD-modell för symmetriskt rör



Figur 4.2 –CFD resultat för symmetriskt rör som illustreras i figur 4.1.

a) Temperaturprofil – Värmen sprider sig inte ut mot väggarna.

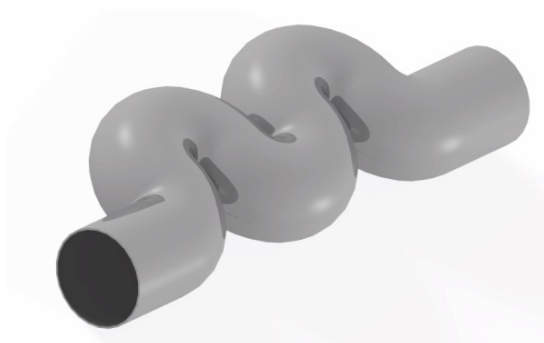
**Temperaturfall: 51 °C**

b) Hastighetsprofil – Hastigheten är högst i en strimma i mitten av röret som följer tempereturprofilen

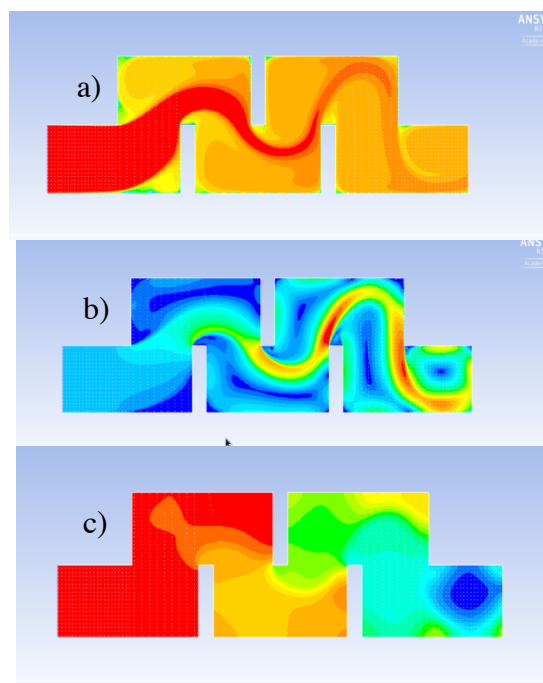
c) Tryckprofil – Trycket är högst på framsidan av hålet och lägst mot väggen bakom.

**Tryckfall: 360 Pa**

Konceptet som visas i figur 4.3 efterliknar en värmeväxlare då så många passager som möjligt eftersträvas. Detta för att kunna bromsa upp fluiden och på så sätt ta vara på energin som denna bär på. Figur 4.4 illustrerar *CFD* simuleringen i 2D med avseende på temperatur, hastighet och tryck.



Figur 4.3 - CAD-modell för spiralrör



Figur 4.4 – *CFD* resultat för spiralrör som illustreras i figur 4.3.

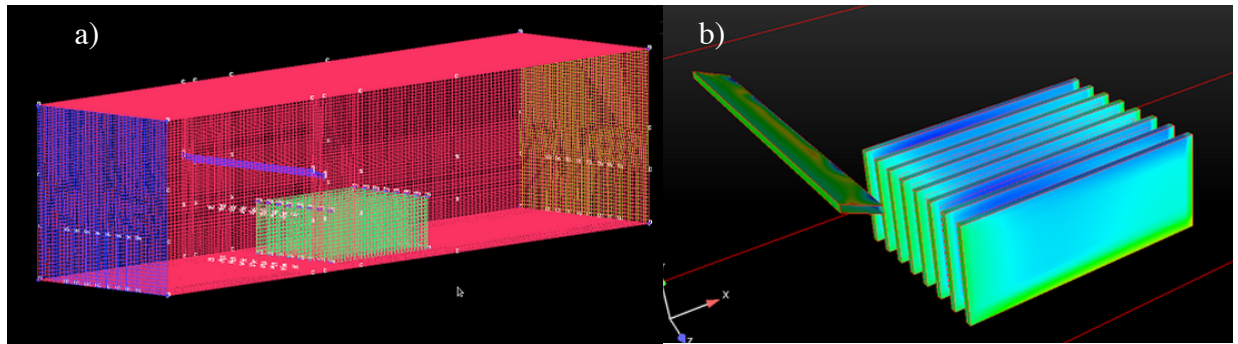
a) Temperaturprofil – Värmen minskar radikalt och det är markant varmast just i en strimma i mitten av röret.

**Temperaturfall: 125 °C**

b) Hastighetsprofil – Hastigheten är högst vid röd färg och till följd av mycket turbulens är denna högst i slutet av röret.

c) Tryckprofil – Tydlig tryckförändring kan ses längs rörgeometrin.

**Tryckfall 19000 Pa.**



Figur 4.5 - 3D-modell i EnSight för fläns med ledskena

Simuleringarna för förändring av den inre rörgeometrin utfördes enligt figur 4.5 a), där den blå ytan är inflöde och den gula utflöde. Det gröna området inne i röret symboliserar flänsarna och det blåa horisontella planet i mitten är ledskenan. Försöken gjordes i två omgångar, en gång med ledskena och en gång utan för att utvärdera skillnaden. En förstora bild på flänsarna och ledskenan kan ses i figur 4.5 b).

För försök utan ledskena:

Tryckfall(Stad): **8 Pa**    Tryckfall(Landsväg): **55 Pa**    Tryckfall(Motorväg): **210 Pa**

Temperaturfall: **47 °C**

Turbulensvärde på flänsar: **9.3 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>**

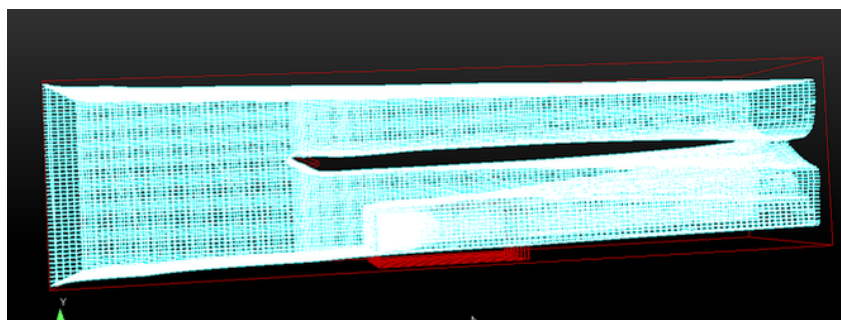
För försök med ledskena:

Tryckfall: **115 Pa**

Temperaturfall: **47 °C**

Turbulensvärde på flänsar: **7.0 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>**

I figur 4.6 visas temperaturprofilen när luften flödar runt ledskena och flänsarna. Ledskenan påverkar ej flödet kring flänsarna som önskat, utan bidrar endast till ett högre mottryck.



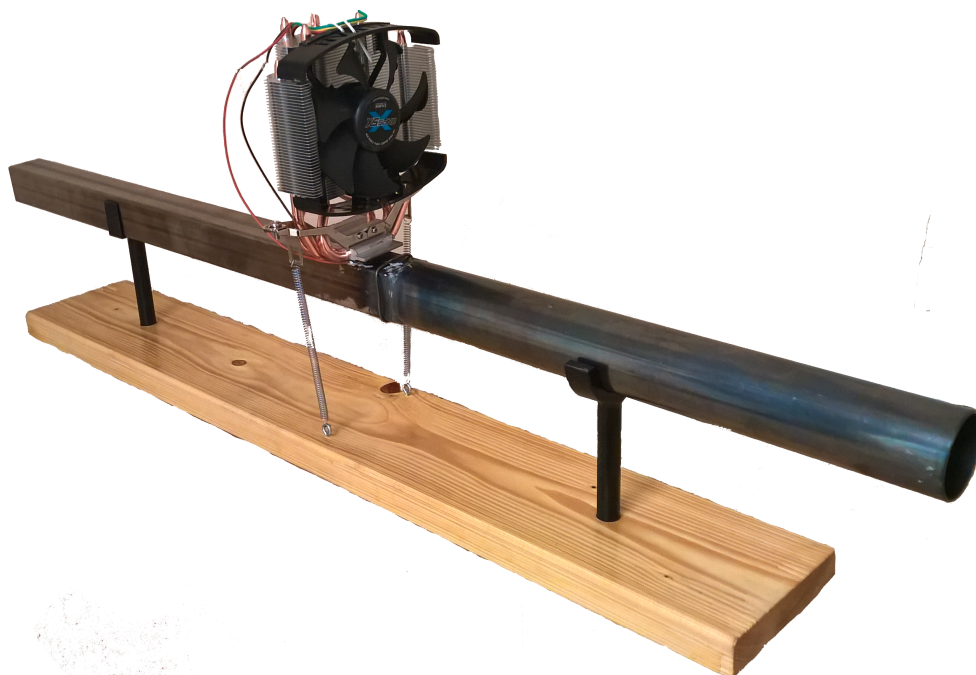
Figur 4.6 - Hur temperaturen med ett rör med ledskena distribueras

## 4.2 Experiment

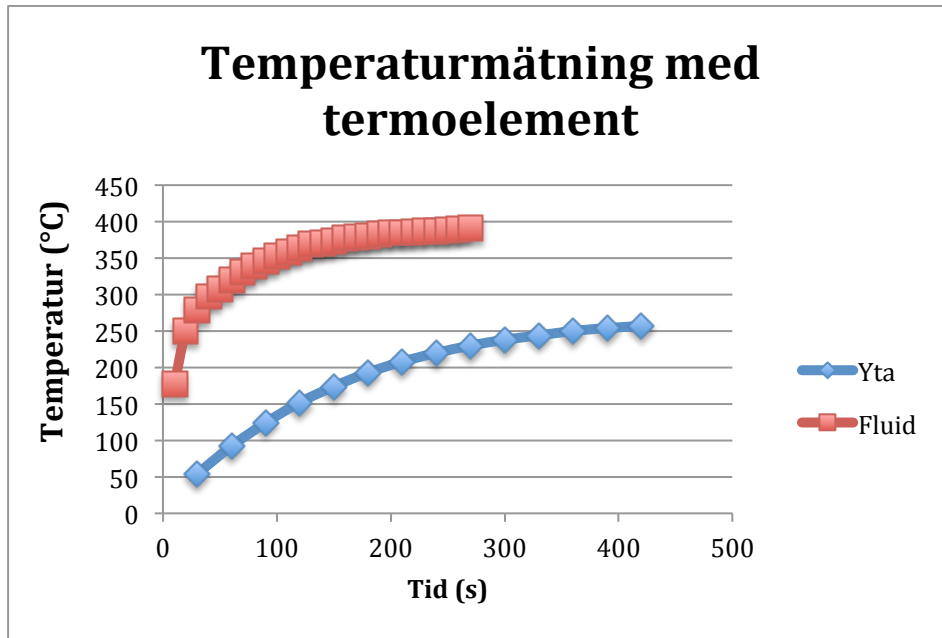
Utifrån ritningarna i Appendix E byggdes en prototyp som ses i figur 4.7. På denna gjordes sedan en rad olika tester. Genom att blåsa varmluft med en varmluftspistol testades värmeöverföringen, effekten som gick att få ut med ett Peltierelement samt hur effekten förändrades om två Peltierelement seriekopplades alternativt parallellkopplades. Dessa resultat presenteras i detta kapitel.

### 4.2.1 Värmeöverföring i rör

Data från mätningarna har plottats i en graf för att åskådliggöra hur temperaturen på röret ändras med tiden. Figur 4.8 visar hur temperaturen ändras med tiden på ytan av röret samt hur den ändras för luften som flödar genom röret. Temperaturkurvan för fluiden planar ut mot 400 °C, vilket innebär att det sannolikt är den varmaste varmluftspistolen förmår skicka ut. Det finns förstås risk för att det sker värmeförluster och att temperaturen är lägre än den verkliga. Efter sju minuter är den uppmätta temperaturen på ytan av röret cirka 250 °C.



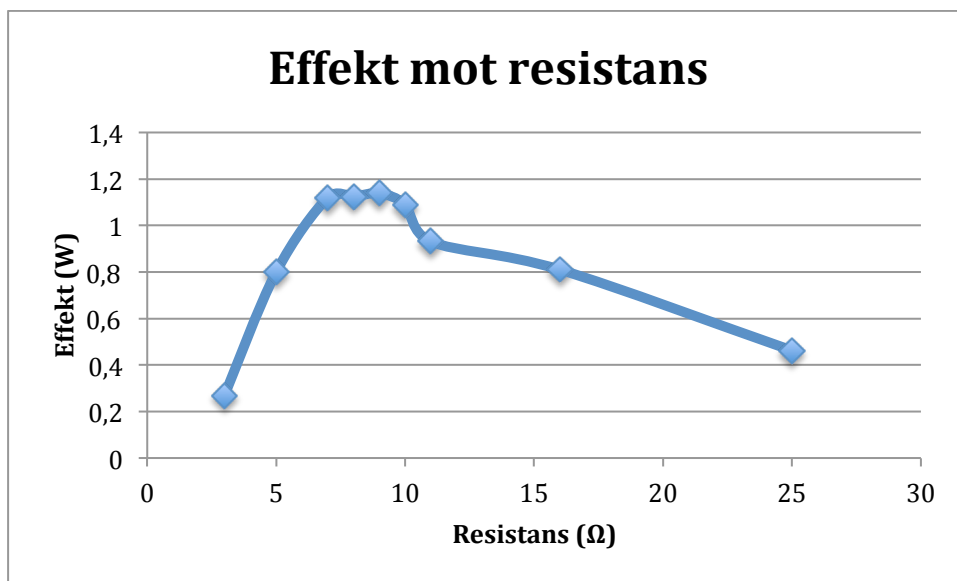
*Figur 4.7 – Prototyp för avgasrör*



Figur 4.8 - Temperatur hos fluid samt rörets yta

#### 4.2.2 Maximal effekt ur ett Peltierelement

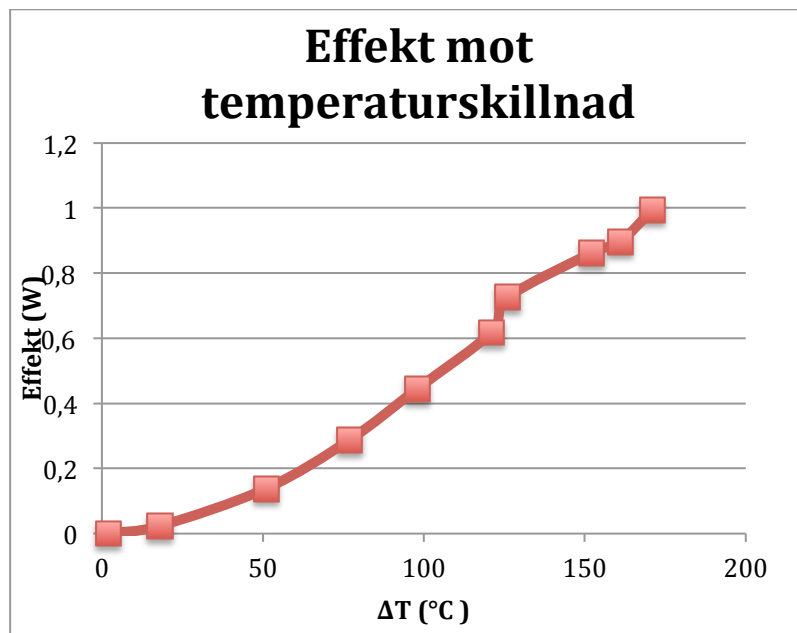
I försöket för att få ut maximal effekt ur Peltierelementet uppmättes spänningen 5,8 V för Peltierelementet vid en öppen krets och temperaturen 200 °C. Eftersom viss resistans förekommer i ledningar kan det finnas en felmarginal i resultatet. När sedan resistansen varierades mellan 3 och 25 Ω erhöles en effektkurva som är plottad i figur 4.9. Där framgår det att den högsta effekt ligger på kring 1,15 W vid en resistans mellan 6 och 10 Ω. Spänningen i dessa punkter låg mellan 2,8 och 3,3 V vilket ligger relativt nära halva spänningen för den öppna kretsen och resultatet anses rimligt.



Figur 4.9 – Effekt mot resistans vid 200°C

### 4.2.3 Effektens beroende av temperaturskillnaden

Data från försöket har plottats i figur 4.10 med effekten mot temperaturskillnaden mellan den varma och den kalla sidan på Peltierelementet med fast resistans.

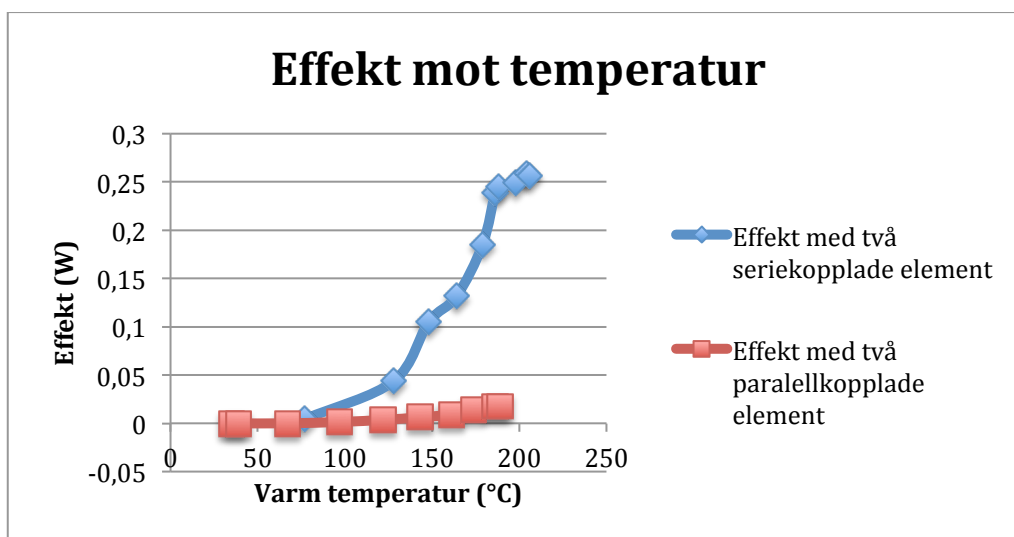


Figur 4.10 - Effekt mot temperaturdifferens vid försök med fast resistans.

Figur 4.10 visar att effekten blir större då temperaturskillnaden ökar mellan den varma och den kalla sidan på Peltierelementet. Den största temperaturskillnaden skapades då flänsarna på den kalla sidan av elementet kylde med tryckluft, och då uppnåddes även den största effekten.

### 4.2.4 Effekt med två Peltierelement

Resultaten från försöken med två Peltierelement har plottats i figur 4.11 med effekten mot temperaturen på röret.



Figur 4.11 – Effekt mot temperatur för två seriekopplade och parallellkopplade Peltierelement där fläktens inre resistans är  $0,9 M\Omega$

Ur figur 4.11 framgår det att effekten då Peltierelementen seriekopplade är betydligt högre än då de är parallellkopplade. Trots detta är effekten med två seriekopplade element placerade efter varandra inte större än då endast ett element används. Detta går att se vid jämförelse med tidigare försök utförda med endast ett Peltierelement.

## 4.3 Beräkningar av värmeöverföring

I detta kapitel presenteras de resultat som berör värmeöverföring mellan Peltierelementet och röret samt hur flänsar påverkar överföringen.

### 4.3.1 Värmeledning på insida och utsida

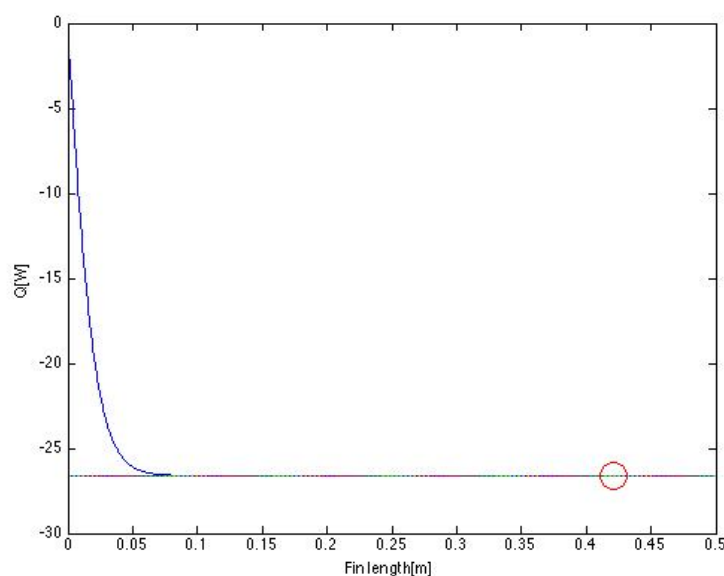
De olika konvektionskonstanterna för de tre körtyperna är tabellerade i tabell 4.1.

Tabell 4.1 – Konvektion i avgasröret för olika typer av körning.

Körmiljö	Konvektion i röret ( $h_{in}$ ) [W/m <sup>2</sup> K]	Konvektion på röret ( $h_{out}$ ) [W/m <sup>2</sup> K]
Stadskörning	25.41	19.42
Landsvägskörning	45.65	50.48
Motorvägskörning	77.81	79.25

### 4.3.2 Energiflöde av flänsar

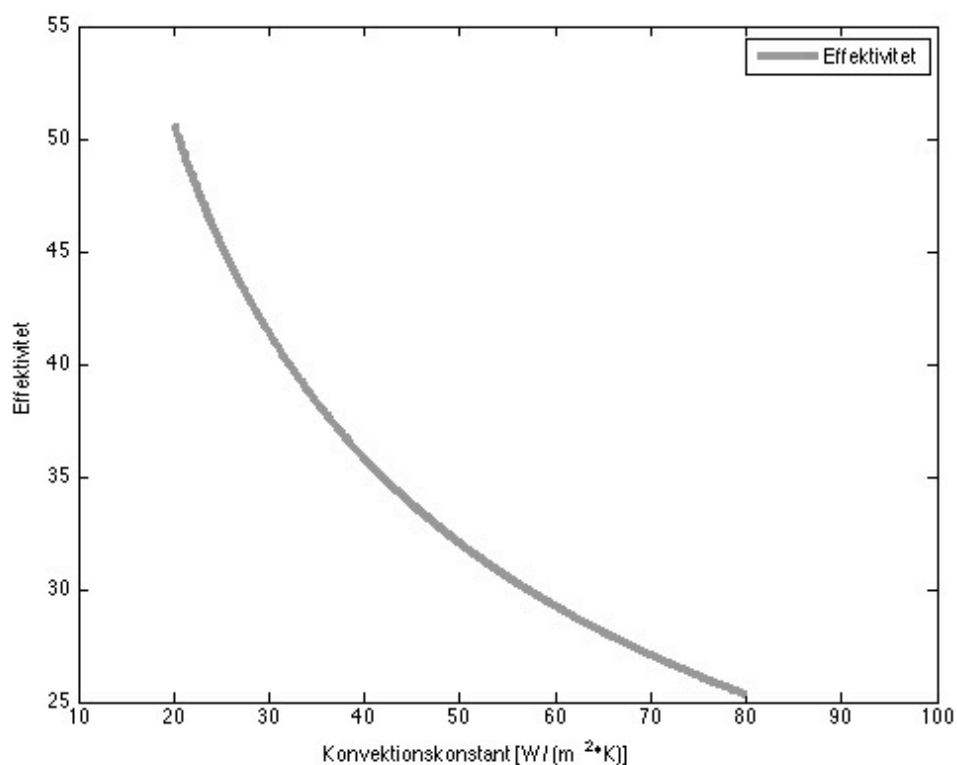
För stadskörning är konvektionskonstanten 25.41 W/m<sup>2</sup>K och den optimala höjden på flänsen kan ses i figur 4.12. Det är i det inringade området som flänsen kan antas vara oändligt lång men mellan 70 mm och 400 mm är förändringen så liten så redan här är energiflödet nära maximalt.



Figur 4.12 – Energiflödet beroende på längden av flänsen vid stadskörning.

För landsvägskörning och motorvägskörning ser figuren för optimal flänslängd ut på liknande vis, men eftersom konvektionen skiljer sig är den optimala längden för de tre körtyperna olika. Landsvägskörning har en konvektion på  $45.6541 \text{ W/m}^2\text{K}$  och den optimala längden under det förhållandet är 360 mm och kan antas optimalt efter 60 mm. Vid motorvägskörning är konvektionskonstanten  $77.8141 \text{ W/m}^2\text{K}$  och den optimala längden är 270 mm och kan antas optimal efter 50 mm.

Det kan konstateras att den maximala längden på flänsen minskar ständigt när konvektionskonstanten ökar. När dimensionerna på flänsen var konstanta och konvektionskonstanten varierade blev resultatet för effektiviteten enligt figur 4.13. Figuren visar att effektiviteten minskar när konvektionskonstanten ökar. Flänsens storlek kommer alltså ha olika stor betydelse beroende på vilken typ av körning det är. Därför är optimala storleken på flänsar beroende av omgivande förhållande.



Figur 4.13 – Effektivitetökning av fläns med konstanta dimensioner och en varierande konvektionskonstant

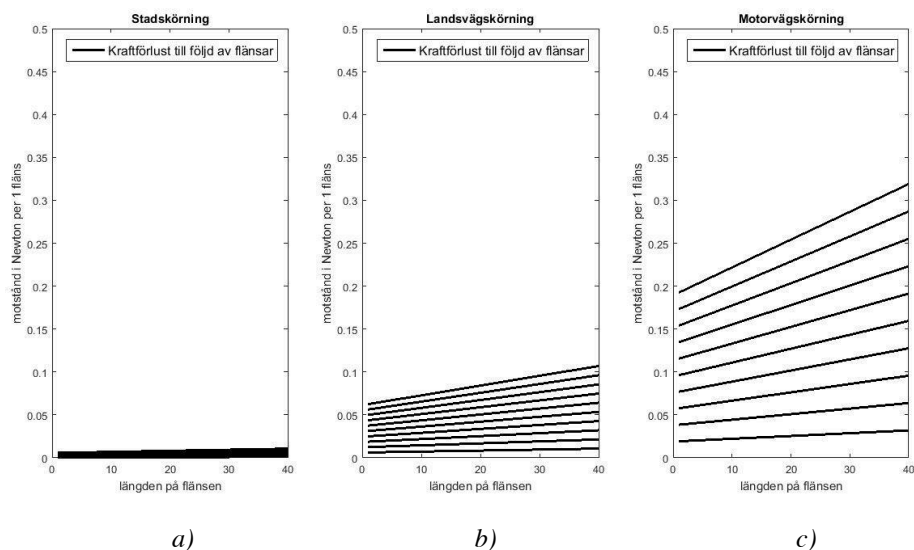
### 4.3.3 Luftmotstånd av flänsar

Den maximala effektförlusten fås när flänsen är som längst och fordonet körs på motorväg. Värdet på den maximala effektförlusten är i detta fall 9,7 W. Beräkningarna av optimal flänshöjd för olika körtyper gav resultatet i tabell 4.2. Förlorad effekt är tagen för den optimala höjden av fläns och varierar med flänsens längd ifrån 10-400 mm.

I figur 4.14 visualiseras samtliga luftmotstånd för tre olika körtyper och varierande flänshöjd. Som det framgår i figuren visar a) för stadskörning, b) för landsvägskörning och c) för motorvägskörning. På y-axeln har vi motståndet i Newton för en fläns där varje streck motsvarar en flänshöjd från 10-100 mm. På x-axeln visas längden på flänsen från 10-400 mm.

Tabell 4.2 – Förlorad effekt på grund av flänsens höjd vid olika typer av körning.

Körmiljö	Optimal flänshöjd [mm]	Effekt förlorad [W]
Stad	100	0.0317 → 0.0792
Landsväg	50	0.5217 → 0.7477
Motorväg	40	2.4444 → 3.6667



Figur 4.14 - Motståndet beroende på flänsens höjd. a) visar för stadskörning, b) för landsvägskörning och c) för motorvägskörning

### 4.3.4 Mottryck

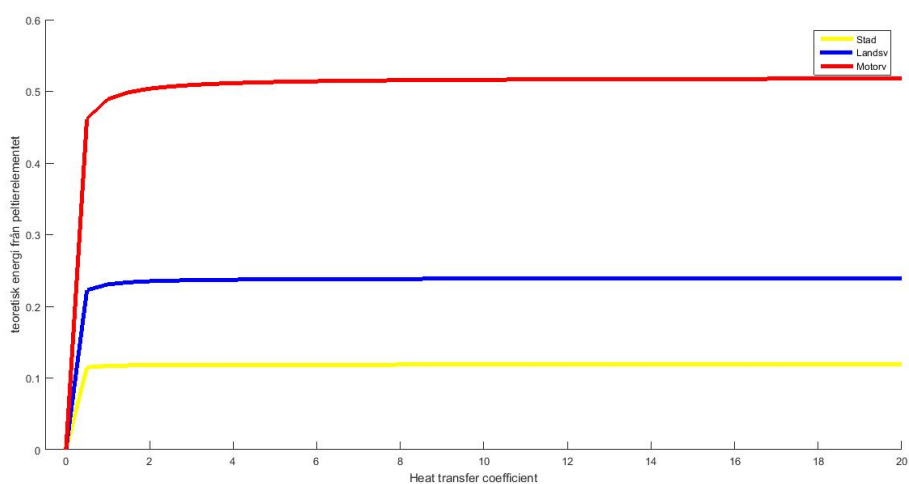
Beräkningar genomfördes för att ta reda på hur stor bränsleförlust varje Pascal av mottryck innebar. Resultaten redovisas i tabell 4.3.

Tabell 4.3 - Bränsleförlust beroende på körning i olika miljöer.

Körmiljö	$V_{\text{bränsle}}$ (l/s)	Förlust (W/Pa)
Stad	$6,07 \cdot 10^{-4}$	0,00977
Landsväg	0,0013912	0,067
Motorväg	0,00299	0,144

### 4.3.5 Materialets påverkan

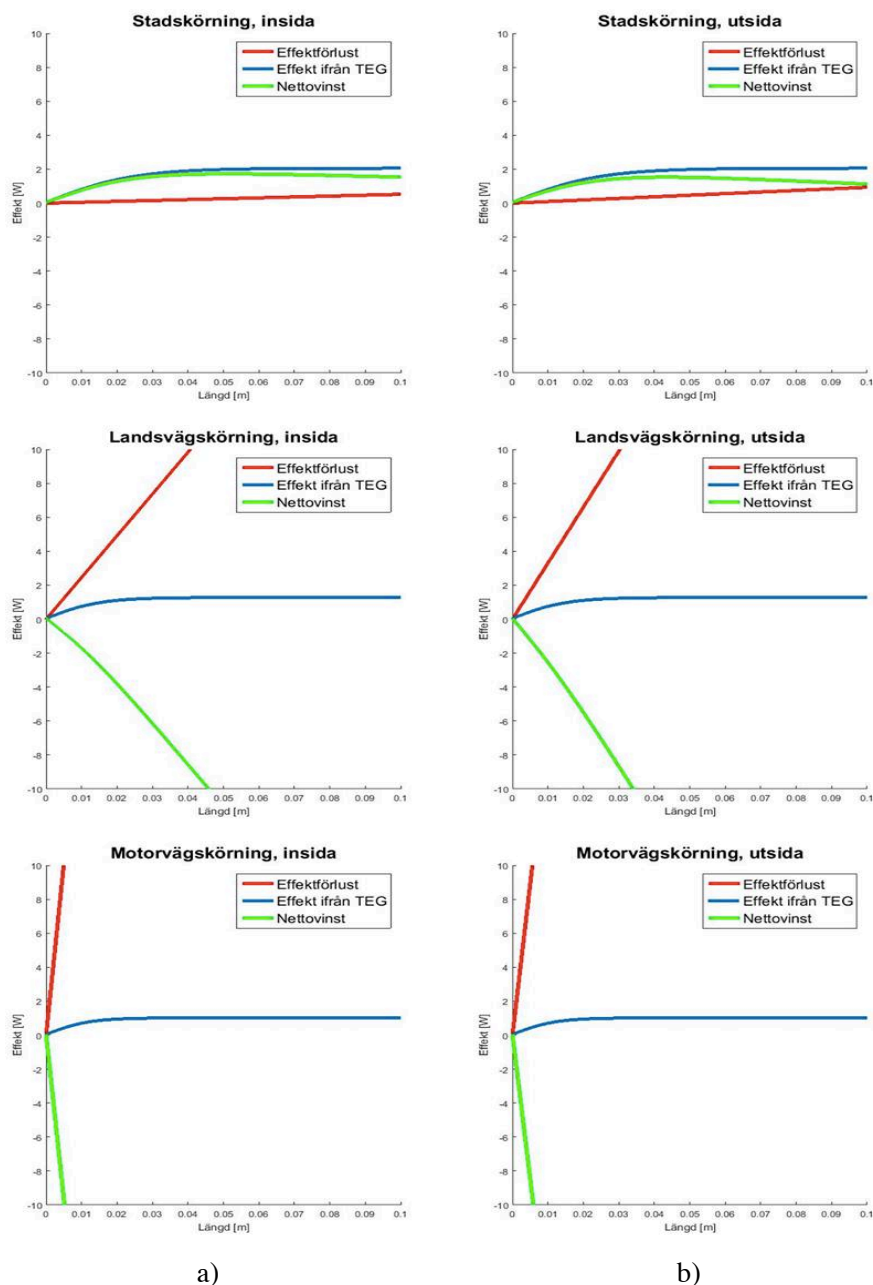
Variationen av värmeöverföringskoefficienten har plottats på y-axeln relativt hur värmeledningskoefficienten ökar på x-axeln. Som det framgår i figur 4.15 så har värmeledningskoefficienten ingen inverkan så länge värdet är över ungefär 2 W/mK. Stål har  $k \approx 16$  W/mK beroende på vilken sorts legering det är.



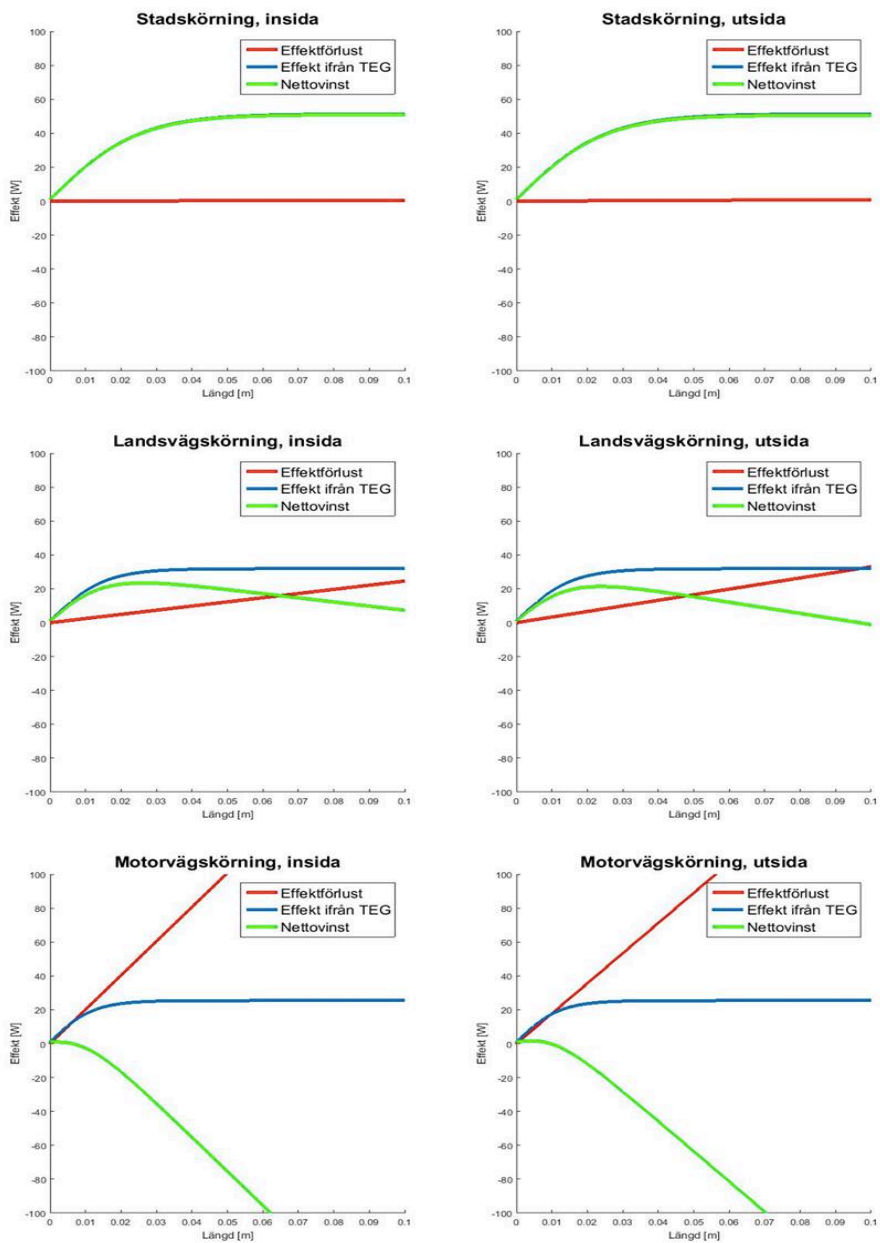
Figur 4.15 – Värmeöverföringskoefficienten beroende av värmeledningskoefficienten.

### 4.3.6 Optimal flänshöjd

Förändring i mottryck i motorn och luftmotstånd under bilen som ett resultat av flänsars applicering utvärderades. Dessa faktorer vägdes mot hur mycket mer effekt som potentiellt skulle kunna utvinnas om flänsar användes. Figur 4.16a) och 4.17a) visar resultat för mottrycket och figur 4.16b) och 4.17b) visar för luftmotståndet för körning i olika miljöer. Gröna streck visar nettovinst medan de röda visar förlust på grund av mottryck eller luftmotstånd. De blå strecken visar den potentiella vinsten som kan fås ut med flänsar. Samtliga resultat är beräknade gentemot höjden på flänsen och plottades därför mot detta. Resultaten beräknades även för en fläns som var 40 mm lång och 1 mm bred. Resultaten är beräknade på det Peltierelement som användes i försöken och i figur 4.16 antogs en verkningsgrad på 4 %. Figur 4.17 visar hur situationen skulle se ut om verkningsgraden hade varit 100 %. På så sätt kan det vad förhöjd verkningsgrad skulle innebära.



Figur 4.16 - Visar hur applicering av flänsar skulle påverka mottrycket i motorn.



a)

b)

Figur 4.17 - Visar hur applicering av flänsar skulle påverka luftmotståndet under bilen.

## 5 Diskussion

För att kunna utvärdera resultatet kommer dessa att diskuteras i följande avsnitt. Arbetet har tidigare delats upp i en beräkningsdel med tillhörande simuleringar, samt en experimentdel. Diskussionen ifrån de olika momenten kommer att delas upp för att kunna förmedla de tankegångar och slutsatser som arbetet föranledde på bästa sätt. Observera att diskussionen baseras på de antagande och resultat som erhållits.

### 5.1 Värmeöverföring

För att få ett så stort energiflöde genom Peltierelementet som möjligt behöver värmeöverföringen mellan avgaserna, Peltierelementet och omgivande luft vara så stor som möjligt. Resultaten från beräkningarna i tabell 4.3 av mottryckets betydelse i avgassystemet visar att små ökningar av mottrycket ger en stor försämring av bränsleförbrukningen. Simuleringarna i *ANSYS CFD* visar att små förändringar av rörets geometri, speciellt skarpa eller snäva svängar, ger ett stort tryckfall och därmed ett högt mottryck. Strömlinjeformade förändringar i röret ger ett lågt tryckfall, men eftersom Peltierelementet kräver plana ytor krävs det att röret också har plana ytor, vilket ofta medför skarpa hörn. Vid sammankoppling av beräkningarna på mottryck och försöken på effekten ut av ett Peltierelement framgår i figur 4.16 att det krävs ett lågt tryckfall för att nettoeffekten som fås ut av systemet ska vara högre med Peltierelement än utan. Större förändringar på rörets geometri är sannolikt negativt för fordonets verkningsgrad. Detta gör det svårt att motivera geometriförändringar på röret för att öka värmeöverföringen till ett eventuellt Peltierelement.

I kapitel 3,3,5 undersöktes hur mycket värmeöverföringen var beroende av ledningsförmågan och hur mycket som var beroende av konvektionen. Resultatet visade att när väggarna är tunna så spelar ledningen för materialet inte någon roll så länge som ledningskoefficienten är över  $5 \text{ W/mK}$ , vilket den är för alla vanliga metaller, vilket visas i figur 4.15. Alltså borde termen för ledning kunna försummas i beräkningar. Värmeöverföringen beror därför till störst del på konvektionen. Viktigt att komma ihåg är att värdena för konvektionen endast är en approximation då dessa är väldigt komplexa att beräkna, speciellt på utsidan av röret. Där har det antagits ett turbulent flöde över en plan platta. Konvektionen på utsidan av röret kommer troligtvis att försämrats med tiden bland annat på grund av smutsbeläggningar.

För att förbättra värmeöverföringsförmågan mellan avgasflödet och Peltierelementet undersöktes användningen av flänsar. Längden på flänsarna bör enligt beräkningar vara så långa som möjligt upp till 100 mm eftersom detta ger bäst energiflöde. Dock begränsas längden av flänsarna på utsidan av bland annat avståndet mellan fordon och väg. Många bilar är idag väldigt låga och farthinder på vägarna gör att det finns risk att stöta i. På insidan av röret begränsas flänsarnas längd av rördiametern samt mottrycket. Vid användning av flänsar gäller generellt, som kan ses i figur 4.13, att effektiviteten  $\epsilon$  minskar när konvektionskonstanten  $h$  ökar. Detta innebär att flänsens storlek kommer ha mindre betydelse om konvektionen blir större. Konvektionen förändras mellan de olika typerna av körning och är som minst vid stadskörning. Om luftmotsstånd och mottryck försummas borde den optimala storleken på flänsarna tas för när konvektionen är som lägst, det vill säga vid stadskörning.

För att utreda mottryckets betydelse och flänsarnas påverkan på detta gjordes simuleringar i *CFD*. Dessa simuleringar visar att mottrycket blir relativt stort vid användning av flänsar på insidan av röret enligt kapitel 4.1. Tillsammans med resultaten från kapitel 4.3.4 där mottryckets inverkan på bränsleförluster utreds, kan det konstaterats att införandet av flänsar kan ge stora effektförluster. Eftersom det är stora flänsar som användes under simuleringen kommer troligtvis mindre flänsar inte ge ett lika stort mottryck. Enligt beräkningarna på flänsarnas inverkan på värmeöverföringen kan små flänsar ge en betydande ökning av energiflödet, vilket gör att små flänsar kan ge en högre nettoeffekt på systemet, se figur 4.12. Detta beror på om effektförlusten som orsakas av dessa flänsars mottryck är mindre än den effekttökning ett Peltierelement skulle kunna ge upphov till. Enligt beräkningar är det svårt att få en positiv nettoeffekt med flänsar i systemet och med det Peltierelement som använts.

För att undersöka om geometriförändringar eller luftriktare i röret skulle kunna påverka värmeöverföringsförmågan genomfördes *CFD*-simuleringar. Försöken på ett rör med en ledskena för att rikta luften mot en yta visar att ledskenan enbart stör flödet utan att rikta det mot ytan enligt figur 4.6. Mottrycket blir därför större samtidigt som värmeöverföringen till rörets vägg blir lika eller sämre, och därför är en ledskena inte aktuellt att använda. Ledskenan skulle kunna placeras annorlunda i röret eller med en annan utformning men med tanke på hur känsligt systemet är för ökat mottryck kommer det troligtvis inte leda till någon förbättring.

Undersökningen av användandet av flänsar på utsidan av röret visade att vid låg hastighet ökar luftmotståndet mest till följd av höjdskillnad på flänsarna. Vid högre hastighet ökar motståndet mest till följd av länder på flänsen. Vid största flänsen i figur 4.14c), är det maximala motståndet ungefär 0.32 N per fläns och det medför en effektförlust på 9.7 W. Detta är ett högt värde och hänsyn måste således tas till hur stora flänsar som kan implementeras utan att skapa en större effektförlust än effektvinsten som kan fås ut ur Peltierelementen. Dessa värden är dessutom beräknade per fläns och om istället 10 flänsar används så bör en 10 gånger större effektförlust erhållas.

Vid högre hastigheter lönar det sig inte med att använda flänsar, varken på in- eller utsida eftersom de inte förbättrar värmeöverföringen utan endast medför större tryckfall och luftmotstånd. Vid lägre hastigheter som stadskörning är flänsar fördelaktigt fram till en viss höjd på flänsen. Det är viktigt att understryka att värdena som fås fram är baserade på de mätdata som har erhållits vid experiment på ett specifikt Peltierelement. Om ett annat Peltierelement hade använts så hade kanske inte resultatet blivit detsamma. Figur 4.17 visar ett exempel på hur det hade sett ut om Peltierelementen hade haft en bättre verkningsgrad. Enligt den, kommer det vara positivt att använda flänsar vid landsvägskörning med ett Peltierelement som har en maximeffekt på 14 W. Av detta kan slutsatsen dras att en förbättring av verkningsgraden hos Peltierelementen troligtvis är nödvändig för att användning skall vara aktuellt inom fordonsindustrin. Detta bör dock ställas i jämförelse med att det vid stadskörning tillförs 25 kW i form av bränsle i motorn.

Enligt tidigare diskussion lönar det sig att använda Peltierelementen tillsammans med flänsarna vid låga hastigheter. Det som försöken undersökt är användning i bilar. Bilar har dock stor variation i hastighet och håller ibland en väldigt hög fart, som till exempel på motorväg, då flänsar skulle vara negativt. Det kan därför finnas andra användningsområden för generatorerna. Peltierelement skulle kunna appliceras i fordon som inte rör sig lika fort, exempelvis traktorer eller andra arbetsfordon. Till följd av dessa fordons låga hastigheter hade det möjligtvis lönat sig att använda Peltierelement för att få ut en större bränsleeffektivitet. Ett annat alternativ är användning av ställbara flänsar för personbilar. Att ha flänsar som anpassar sin längd till hastigheten och således är långa vid stadskörning för att sedan dra ihop sig vid högre hastigheter. Flänslängden skulle kunna anpassas och appliceras även vid en stillastående situation som trafikljus eller bilköer. På detta sätt hade längden på flänsen alltid kunnat anpassas för att få ut maximal värmeöverföring.

Under projektets gång har Peltierelementets placering varit tänkt precis efter katalysatorn. Enligt teoriavsnittet kan avgasernas temperatur inte sänkas innan katalysatorn eftersom den kräver höga temperaturer för att fungera optimalt och därför bör ingenting placeras innan denna. Det har dock aldrig undersökts huruvida det skulle fungera att placera Peltierelementen i närheten av ljuddämparen. Som tidigare nämnts i teorin, bromsas gaserna upp i ljuddämparen för att minimera ljudet. Därför skulle Peltierelement kunna placeras i samband med denna inbromsning för att kunna ta ut den värmeenergi som avges. Detta hade troligtvis inneburit en omkonstruering av ljuddämparen men hade kunnat visa sig lönsamt om tillräckligt med efterforskning lagts ned på att undersöka detta.

Istället för flänsar kan vattenkylning användas för att kyla den kalla sidan på Peltierelementet. En fördel är att god kylning erhålls då konvektionstalet till vatten är betydligt högre än luft. Tanken att koppla upp till bilens redan existerande kylsystem innebär dock att kylarvätskan kommer att behöva pumpas en längre sträcka vilket medför att pumparbetet kommer öka. Till följd av större antal komponenter som skall kylas kommer vätskan värmas upp mer vilket gör att den behöver kylas mer. Det betyder att kylaren antingen måste bli större eller så måste kylfläkten arbeta mer. En större kylare kräver mer utrymme, vilket är väldigt begränsat i bilar. Ytterligare ett frågetecken skulle vara att kylarvätska hos dagens bilar ligger runt 100°C, vilket potentiellt skulle bli för högt för att kyla ett Peltierelement. Det finns alltså både fördelar och nackdelar med att använda vätskekylning. Dock finns det hög potential till följd av det höga konvektionstalet och är därför något som skulle kunna undersökas mer noggrant i framtida studier.

## 5.2 Experiment

Från försöket för att få ut Peltierelementets maximala effekt erhöles 1,15 W vid 200 °C på den varma sidan. Då hade kretsen en yttre resistans mellan 6 och 10  $\Omega$ . Det är alltså viktigt att det som ska drivas av effekten från Peltierelementet inte har för hög resistans ifall en hög effekt eftersöks. Effekten hade möjligtvis kunnat bli större under optimala förhållanden. Till exempel kan kylningen på ovansidan av generatorn varit otillräcklig. Peltierelementet som använts i försöken har en maxtemperatur på 240 °C vilket inte passar i en fordonsapplikation där avgaserna ofta blir upp mot 700 °C. Där hade en annan termoelektrisk generator med högre temperaturintervall varit mer lämplig och kanske till och med kunnat generera en större eleffekt.

Försöken med två Peltierelement visade att parallellkoppling gav lägre effekt än seriekoppling. Dock var effekten vid seriekoppling inte större än effekten med endast ett Peltierelement. Detta anses rimligt eftersom generatorerna var placerade efter varandra på röret och då får olika temperaturintervaller. Det innebär att de kommer belasta varandra och strömmen genererad i den första generatorn kommer gå igenom det andra och skapa en temperaturdifferens istället för att den alstrar ström. Ifall generatorn hade placerats på samma höjd så hade ett rimligt resultat varit att parallellkoppling eller seriekoppling inte spelar någon roll för effekten. Då hade även den maximala effekten ur de båda generatorerna kunnat erhållas utan att de belastar varandra och drar ner effekten.

I en fordonsapplikation där effektivitetsökning är målet så hade det krävts mer än ett Peltierelement för att få ut en användbar effekt som kan kompensera för eventuella ökningarna i bränsleförbrukning på grund av mottryck eller luftmotstånd. Idealt sett borde effekten från generatorn kunna multipliceras med antal generatorer för att få ut den totala effekten. I verkligheten kommer dock alltid en viss belastning ske mellan generatorerna. Därför är det av vikt att kunna applicera generatorerna så att de uppnår samma temperaturdifferens för att kunna minimera belastningen. En intressant lösning skulle vara att placera Peltierelement på olika delar av avgassystemet med olika temperaturintervall. Då kan ett par generatorer som jobbar vid samma temperaturnivå sammankopplas till ett batteri och ett par generatorer som jobbar vid en annan temperaturnivå sammankopplas till ett annat batteri. På så sätt erhålls en större totaleffekt och begränsningen av hur många Peltierelement som kan användas minskar.

Termoelektriska generatorer är små, lätta och behöver inget underhåll. Av denna anledning finns det ett stort intresse av att applicera dessa generatorer i människans vardag som en del i att gå mot ett mer hållbart samhälle. För att det ska bli ekonomiskt hållbart att använda termoelektriska generatorer är det betydande att höja verkningsgraden. Det kan vara därför dagens utveckling till stor del satsar på att skapa nya och bättre material för att kunna höja denna verkningsgrad. Det finns dock flera problem med att skapa ett bättre material. Det handlar om att göra ett så bra material som möjligt med bästa möjliga godhetstal. Ska termoelektriska generatorer bli mer kommersiellt så måste det vara ekonomiskt hållbart att tillverka dem och de måste därför bestå av material som inte kostar för mycket. Det krävs alltså ett högre  $ZT$  per krona än vad som är tillgängligt idag. Materialen har följaktligen stor betydelse för termoelektriska generatorers framtid. Hur sedan efterfrågan ser ut är svårt att uppskatta. Ifall fordonsflottan utvecklar sig mot el så finns kanske ett mindre behov av att ta ut energi ur avgaser.

## 6 Slutsats

De erhållna resultaten, experimentella såväl som teoretiska, överensstämmer med tidigare gjorda studier om tillämpning av termoelektriska generatorer i fordon. Geometriska förändringar på röret för att öka värmeöverföringen och underlätta applicering av Peltierelement är inte ett bra alternativ då undersökningar har visat att mottrycksförluster i motorn blir stora. Alla förändringar på avgassystemet bör göras med försiktighet för att det inte negativt ska påverka bränsleförbrukningen och användandet av flänsar kan därför i princip uteslutas. En applicering av ett Peltierelement kan möjligtvis ge en liten ökning av bränsleeffekten men för att få en betydande effektökning så krävs flera ihopkopplade Peltierelement eller nya termoelektriska generatorer med högre verkningsgrad. Huruvida detta är lönsamt beror på hur stor kostnaden skulle bli för en sådan installation i kombination hur mycket det skulle kunna öka bränsleeffekten.

Trots de brister som finns har termoelektriska generatorer potential att kunna bli en del av framtidens etablerade energiframställningsmetoder. Andra placeringar i fordonet såsom integrering i existerande kylsystem eller ljuddämpare skulle kunna ha potential för ökad värmeåtervinning och kan vara intressant att studera djupare. De termoelektriska generatorernas möjlighet att bli kommersiellt gångbara begränsas främst av materialet. Nya material med högre verkningsgrad och ZT per krona är i princip en förutsättning för utbredd användning i framtiden.



## 7 Referenser

1. Fairbanks W John. (2012). Automotive Thermoelectric Generators and HVAC. US Department of Energy. *2012 Annual Merit Review DOE Vehicle Technologies Program and Hydrogen and Fuel Cells Program*. Washington, DC.  
Tillgänglig: [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/ace00e\\_fairbanks\\_2012\\_o.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/ace00e_fairbanks_2012_o.pdf).  
(Hämtad: 2015-02-03)
2. Trafikverket. *Pdf 11 avgasrening för tunga fordon*. (2015-03-14).  
Tillgänglig: <http://www.trafikverket.se/Sok-pa-trafikverketse/?query=avgasrening>.  
(Hämtad: 2015-03-23)
3. Basel Ismaeil I\* & Wael Ahmed H\*\*. (2009). *Termoelectric Power Generation Using Waste-heat Energy as Alternative Green Technology*. \*Department of Mechanical Engineering, Lakehead University, Canada. \*\*Component Life Techonoly, Atomic Energy of Canada Ltd, Canada. Recent Patents on Electrical Engineering 2009, 2, 27-39. doi: 10.2174/1874476110902010027.
4. Kleinhenz E. Joanne & Schmeichel D. Steven Donaldson. (1981). *Fuel Efficient Exhaust Systems*. SAE Technical Paper. Minneapolis, MN. doi: 10.4271/810858.
5. König D. J. (2014). Thermoelectrics History recent progress future aspects. 4<sup>th</sup> *Thermoelectrics Conference Utilizing Waste Heat in Transport Industry*. Berlin.  
(Hämtad: 2015-04-28)
6. Naked Science Scrapbook. (2012-02-10). *How do thermoelectric generators work?* (video). University of Cambridge.  
Tillgänglig: <http://www.thenakedscientists.com/HTML/podcasts/video/scrapbook/show/20120210/>  
(Hämtad: 2015-02-20)
7. Palmqvist Anders Professor Chalmers Tekniska Högskola. (2015-05-06). Vice styrkesområdesledare för materialvetenskap. Institution för Kemi och Kemiteknik. Avdelningen för Teknisk Ytkemi.
8. Olsson G. Lars. *Effektmätning*. Nationalencyklopedin.  
Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/effektm%C3%A4tning>.  
(Hämtad: 2015-03-02)
9. Höglblom Olle Doktorand Chalmers Tekniska Högskola. (2015-04-24). Institution för Kemi och Kemiteknik. Avdelning för Kemisk Reaktionsteknik.
10. Mashadi Behrooz & Crolla David. (2012). *VEHICLE POWERTRAIN SYSTEMS*. United Kingdom. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-1-119-95836-9 (ePDF).
11. Latz Gunnar Doktorand Chalmers Tekniska Högskola. (2015-03-03). Handledare. Institution för Tillämpad Mekanik. Avdelning för Förbränningsteknik.
12. Söderberg Carl Gunnar. *Avgasrening*. Nationalencyklopedin.  
Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/avgasrening>.  
(Hämtad: 2015-02-20)
13. Larsson Ragnar. *Katalysator*. Nationalencyklopedin.  
Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/katalysator>.  
(Hämtad: 2015-02-23)

14. White M. Frank. (2009). *Fluid Mechanics 7<sup>th</sup> edition*. New York City. McGraw-Hill Higher Education. ISBN: 9780071311212.
15. *Catalytic converter* (bild). (2015).  
Tillgänglig: <http://www.preciousmetals.umicore.com/recyclables/SAC/CatalyticConverter/catalyticConverter.jpg>  
(Hämtad: 2015-05-12)
16. Encyclopedia Britannica. *Muffler*. (2015-05-12).  
Tillgänglig: <http://academic.eb.com/EBchecked/topic/396086/muffler>.  
(Hämtad: 2015-05-12)
17. GIK turbo. *TURBOKONVERTERING Bränsleinsprutning Uppgradering*.  
Tillgänglig: <http://www.gikturbo.se/pdf/teoridels.pdf>  
(Hämtad: 2015-02-23)
18. Ivarsson Peter. SA/Principal Engineer VOLVO Cars. (2015-02-10). Department of exhaust system cold end.
19. Gogineni, Prudhvi, Vinay Gada, Babu G. Suresh. (2013). *Cooling Systems in Automobiles & Cars*. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). ISSN: 2249 – 8958.  
Tillgänglig: <http://www.ijeat.org/attachments/File/v2i4/D1447042413.pdf>.  
(Hämtad: 2015-02-26).
20. Incropera, Frank P. DeWitt, David P. Bergman, Theodore L. Lavine, Adrienne S.(2012). *Principles of Heat and Mass Transfer*. United Kingdom. John Wiley & Sons.  
ISBN : 978-0-470-64615-1
21. Stobart R, Wijewardane A & Allen C. ( 2010). The Potential for Thermo-Electric Devices in Passenger Vehicle Applications. SAE Technical Paper. Loughborough University.  
doi:10.4271/2010-01-0833
22. Mori M, Yamagami T, Oda N, Hattori M, Sorazawa M, Haraguchi T. (2009). Current Possibilities of Thermoelectric Technology Relative to Fuel Economy. SAE Technical Paper. Honda R&D Co, Ltd. ISSN 0148-7191
23. Kesti J, Olsson S. (2014) Fluid structure interaction analysis on the aerodynamic performance of underbody panels. Chalmers University of Technology. Master's thesis 2014:68  
ISSN 1652-8557

# Appendix

## A. Beräkningar

### A1. Konvektionskonstanter

Beräkningen av konvektionskonstanterna görs med hjälp av det kända massflödet i röret. Datan för varje körtyper finns i Tabell C2. Samtliga ekvationer är hämtade från Heat and Mass Transfer [1].

Hastigheten beräknas med hjälp av massflödet, densiteten och arean av röret

$$v_{\text{stad,in}} = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0.35 \cdot 1,9635 \cdot 10^{-3}} = 14,55 \quad (\text{A.1})$$

Reynoldstalet beräknas med hjälp av hastigheten

$$\text{Re}_{D,\text{stad,in}} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{0.35 \cdot 14,55 \cdot 0.05}{420 \cdot 10^{-7}} = 6062,5 \quad (\text{A.2})$$

Nusselttalet beräknas med Reynoldstalet och Prantltalet

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{\text{stad,in}} &= 0,023 \cdot \text{Re}_{D,\text{stad,in}}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pr}_{\text{stad,in}}^{0,3} \\ &= 0,023 \cdot 6062,5^{\frac{4}{5}} \cdot 0,725^{0,3} = 22,18 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Konvektionskonstanten beräknas med Nusselttalet

$$h_{\text{stad,in}} = \frac{k \text{Nu}_{\text{stad,in}}}{d} = \frac{57,3 \cdot 10^{-3} \cdot 22,18}{0,05} = 25,41 \quad (\text{A.4})$$

$$h_{\text{landsv,in}} = 45,65 \quad (\text{A.5})$$

$$h_{\text{motorv,in}} = 77,81 \quad (\text{A.6})$$

### A2. Reynoldstal

Reynoldstalet för utsidan beräknas med den karakteristiska längden. Hastigheterna är hämtade från tabell C2.

$$v_{\text{stad,luft}} = v \cdot 1.3 \quad (\text{A.7})$$

$$\text{Re}_{x,\text{stad}} = \frac{\rho v_{\text{stad,luft}} x}{\mu} = \frac{1,1614 \cdot 5,27 \cdot 1.3 \cdot 2}{184,6 \cdot 10^{-6}} = 8.6 \cdot 10^5 \quad (\text{A.8})$$

$$\text{Re}_{x,\text{landsv}} = 2,8 \cdot 10^6 \quad (\text{A.9})$$

$$\text{Re}_{x,\text{motorv}} = 5 \cdot 10^6 \quad (\text{A.10})$$

## Referenser till Appendix A

[1] Incropera, Frank P. DeWitt, David P. Bergman, Theodore L. Lavine, Adrienne S.(2012). Principles of Heat and Mass Transfer. United Kingdom. John Wiley & Sons. ISBN : 978-0-470-64615-1

## B. MatLab

De olika beräkningarna för projektet har genomförts med följande MatLab-script.

### B1. Energiflöde genom väggen

```
clear all
close all
%Räknar på hur k påverkar värmeöverföringen
%De olika h har fåttts från handberäkningar för olika hastigheter i
%röret
%och utanför bilen

%Definierar de olika h får i(i) och utanför(o) röret får olika typer
%av körning

kluft=26.3e-3;
rholuft=1.1614;
myluft=184.6e-7;
PrLuft=0.707;
KaraLangd=2;

%Beräkningar från Appendix A samt ekvationer från Heat and Mass
%Transfer[1].
histad=25.41;

hostad=(kluft/KaraLangd)*0.0296*(((rholuft*KaraLangd*6.85)...
/(myluft))^(4/5))*PrLuft^(1/3);

hilandsv=45.65;

holandsv=(kluft/KaraLangd)*0.0296*(((rholuft*KaraLangd*22.6)...
/(myluft))^(4/5))*PrLuft^(1/3);

himv=77.81;

homv=(kluft/KaraLangd)*0.0296*(((rholuft*KaraLangd*39.715)...
/(myluft))^(4/5))*PrLuft^(1/3);

%Definierar radierna på röret
R2=0.028;
R1=0.025;

%Definierar vad k ska variera mellan
n=1000;
k=linspace(0,500,n);

for i=1:n
%Räknar ut hur U beror på k
Ustad(i)=1/((1/histad)+((log(R2/R1)*R2)/(2*k(i)))+(1/hostad));
Ulandsv(i)=1/((1/hilandsv)+((log(R2/R1)*R2)/(2*k(i)))+(1/holandsv));
Umv(i)=1/((1/himv)+((log(R2/R1)*R2)/(2*k(i)))+(1/homv));
end

%Plottar hur U beror på k
hold all
plot(k,Ustad,'- oy')
plot(k,Ulandsv,'- *b')
plot(k,Umv,'- +r')
xlim ([-0.5, 20])
ylabel('overall heat transfer coefficient')
```

```

xlabel('thermal conductivity')
legend('Stad','Landsv','Motorv')

%Definierar temperaturskillnaden
DeltaTstad=400;
DeltaTlandsv=370;
DeltaTmv=490;

%Räknar ut fluxet (q'=U*DeltaT)
qbizzstad=Ustad*DeltaTstad;
qbizzlandsv=Ulandsv*DeltaTlandsv;
qbizzmv=Umv*DeltaTmv;
figure
hold on
plot(k,qbizzstad,'y')
plot(k,qbizzlandsv,'b')
plot(k,qbizzmv,'r')
ylabel('qbizz')
xlabel('thermal conductivity')

%Räknar ut arean för peltierelementet
Apelt=0.03*0.03;
% Definierar verkningsgraden av peltierelementet till 3
Verkg=0.03;

%Räknar ut mängden energi som går igenom peltierelementet,
multiplicerat
%med verkningsgraden
qstad=qbizzstad*Apelt*Verkg;
qlandsv=qbizzlandsv*Apelt*Verkg;
qmv=qbizzmv*Apelt*Verkg;

figure
hold on
xlim ([-0.5, 20])
plot(k,qstad,'y','LineWidth',4)
plot(k,qlandsv,'b','LineWidth',4)
plot(k,qmv,'r','LineWidth',4)
ylabel('teoretisk energi fr?n peltierelementet')
xlabel('Heat transfer coefficient')
legend('Stad','Landsv','Motorv')

```

## B2. Flänseffektivitet

```
clc
clear all
close all

%Definierar konstanter
w=0.04;
t=0.001;
L=0.1;
k=25;
Tb=500;
Tinf=790+293;
P=2*w+2*t;
Ac=w*t;
Theta=Tb-Tinf;

%Stegrar konvektionen
h=linspace(20,80,1000);

%Beräknar effektiviteten för varje konvektionskonstant enligt Heat
%and Mass transfer [1]
for i=1:length(h)

%Beräknar m och M enligt [1]
m=((h(i)*P)/(k*Ac))^(1/2);
M=Theta*(h(i)*P*k*Ac)^(1/2);

%Beräknar Qf enligt [1]
CaseAQF(i)=M*((sinh(m*L)+(h(i)/(m*k))*cosh(m*L))/(cosh(m*L)+(h(i)/(m*
k))*sinh(m*L)));
eff(i)=CaseAQF(i)/(h(i)*Ac*Theta);

end

%Plottar hur effektiviteten beror på konvektionskonstanten
plot(h,eff,'LineWidth',4)
ylabel('Effektivitet')
xlabel('Konvektionskonstant [W / (m^2*K)]')
hold all
xlim ([10.0, 100])
legend('Effektivitet')
```

### B3. Luftmotstånd

```
% Beräkning av Luftmotstånd vid olika storlekar på flänsar under
bilen
clc
clear variables
close all

for k=1:3
% Givna värden
rho=1.2;
% Reynolds
Restad=8.6*10^5;
Relands=2.8*10^6;
Remotor=5*10^6;

%Lufthastigheter [km/h]
Vstad= 19;
Vlands= 62.6;
Vmotor= 110;
% Loopar över vilken körtyp och ger rätt räknevärden
if k==1
    V=Vstad;
    Re=Restad;
elseif k==2
    V=Vlands;
    Re=Relands;
else
    V=Vmotor;
    Re=Remotor;
end

% Anger CD för framsidan, vilken är konstant
Cdfram=2;
% Beräknar CD för sidorna beroende på körtyp
CdsidaS=0.031/((Re)^(1/7));
%Ansätter begynnelsevillkor och börjar räkna ut motstånden
i=1;
bredd=0.001;
for i=1:10
    hojd=0.01*i;
    Afram=hojd*bredd;
    FframS=Cdfram*1/2*rho*((V/3.6)*1.3)^2*Afram;
    for j=1:40
        langd=0.01*j;
        Asida=langd*hojd;
        FsidaS(j)=CdsidaS*1/2*rho*((V/3.6)*1.3)^2*Asida;
        Ftotal(j)=FframS+FsidaS(j);
    end
end
%Plottar först de tre olika körtypernas luftmotstånd för sig
figure(1)
hold on
subplot(1,3,k)
plot(Ftotal,'b','linewidth',2)
if k==1
    title('Stadskörning')
elseif k==2
    title('Landsvägskörning')
else
    title('Motorvägskörning')
end
end
xlim ([0.0, 40])
ylim ([0.0, 0.5])
```

```

ylabel('motstånd i Newton per 1 fläns')
xlabel('längden på flänsen')
legend('Kraftförlust till följd av flänsar')

% Plottar nu alla i samma figur
figure(2)
hold on
title('Alla tillsammans')
if k==1
    plot(Ftotal,'b','linewidth',2)
elseif k==2
    plot(Ftotal,'r','linewidth',2)
else
    plot(Ftotal,'g','linewidth',2)
end
legend('Förlust - Stadskörning','Förlust - Landsvägskörning','Förlust
- Motorvägskörning')
ylabel('motstånd i Newton per 1 fläns [N]')
xlabel('längden på flänsen [mm]')
end
%Plockar ut max motstånd för att räkna ut effekt för varje körtyp
Fmax=max(Ftotal);
P(k)=(V/3.6)*Fmax;
end
%Skriver ut maxeffekt förluster för varje körtyp
fprintf('Maximal motståndseffekt\n Stadskörning: %4.2f W \n
Landsvägskörning: %4.2f W\n Motorvägskörning: %4.2f
W\n\n',P(1),P(2),P(3))

```

#### B4. Längdberoende

```
clc
clear all
close all

%Definierar konstanter
w=0.04;
t=0.001;

%Skapar en vektor med olika lngder
L=linspace(0,0.5,1000);

%Definierar konstanter
k=25;
Tb=500;
Tinf=790+293;
h=79.25;
P=2*w+2*t;
Ac=w*t;
Theta=Tb-Tinf;

%Räknar ut M och m från Heat and Mass Transfer
m=((h*P)/(k*Ac))^(1/2);
M=Theta*(h*P*k*Ac)^(1/2);

for i=1:length(L)
%Räknar ut qf från typfallet i Heat and Mass Transfer med olika
%längder på flänsen
CaseAQF(i)=M*((sinh(m*L(i))+(h/(m*k))*cosh(m*L(i)))/(cosh(m*L(i))+(h/
(m*k))*sinh(m*L(i))));
end

%Räknar ut effektiviteten enligt Heat and Mass Transfer
eff=CaseAQF/(h*Ac*Theta)

%Plottar
plot(L,CaseAQF)
hold all
plot(L,min(CaseAQF),'r')
Min=min(CaseAQF)
idx = find(CaseAQF - Min < eps, 1);
px = L(idx)
py = CaseAQF(idx)

figure
plot(L,CaseAQF,'r', L, Min, px, py, 'ro','MarkerSize',18)
xlim ([0, 0.20])
ylabel('Q[W]')
xlabel('Fin length[m]')
legend('Stad','Landsv','Motorv')
for i=1:1000
    if Min == CaseAQF(i)
        Length=L(i)
        break
    end
end
end
```

## B5. Nettoeffekt

```
% Program för att påvisa förluster mot vinster med att använda  
%flänsar på in och utsida Programmet plotar effektvinst till följd  
%av flänsar samt effektförlust och differensen mellan de två.
```

```
clear all  
close all  
clc
```

```
%Värden att ändra!  
ata=1; %Peltierelementets verkningsgrad  
Effektmax=1000;  
Peltiereffekt=1;
```

```
% Givna värden  
w=0.04;  
t=0.001;
```

```
L=linspace(0,0.2,201);  
k=25;  
Tb=500;  
Tinf=790+293;  
rho=1.2;
```

```
% Reynolds  
Restad=8.6*10^5;  
Relands=2.8*10^6;  
Remotor=5*10^6;
```

```
%Lufthastigheter [km/h]  
Vstad= 19;  
Vlands= 62.6;  
Vmotor= 110;
```

```
for j=1:3 % Anger ränkevärden beroende på körtyp
```

```
    if j==1  
        V=Vstad;  
        Re=Restad;  
        h1=19.42;  
        h2=25.41;  
        hog=8/15;  
        forlustvarde=0.00977;  
    elseif j==2  
        V=Vlands;  
        Re=Relands;  
        h1=50.48;  
        h2=45.65;  
        hog=55/15;  
        forlustvarde=0.067;  
    else  
        V=Vmotor;  
        Re=Remotor;  
        h1=79.25;  
        h2=77.81;  
        hog=210/15;  
        forlustvarde=0.144;  
    end
```

```

% INSIDA
% Räkningar ut hur mycket vi teoretiskt kan få ut av våra peltierelement
P=2*w+2*t;
Ac=w*t;
Theta=Tb-Tinf;
for i=1:length(L)

m=((h1*P)/(k*Ac))^(1/2);
M=Theta*(h1*P*k*Ac)^(1/2);
CaseAQF(i)=M*((sinh(m*L(i))+(h1/(m*k))*cosh(m*L(i)))/(cosh(m*L(i))+(h1/(m*k))*sinh(m*L(i))));
eff(i)=CaseAQF(i)/(h1*Ac*Theta);

end

% Räkningar ut vad effektvinsten blir. Om vi övergår det maxvärde som
% finns för vårt peltierelement anges maximala värdet.
for i=1:length(eff)
Vinst(i)=eff(i)*ata*Peltiereffekt;
if Vinst(i)>=Effektmax
    Vinst(i)=Effektmax;
end
end
% Här räknas förlusten för insidan ut.
Forlust=(hog)*L*1000*forlustvarde;
% Vinst mot förlust plotas. även dirrerensen räknas ut och plotas
nedan.
figure(j)
subplot(1,2,1) % Plotar upp resultaten
if j==1 % Anger titel beroende på körtyper
    title('Stadskörning, insida')
elseif j==2
    title('Landsvägskörning, insida')
else
    title('Motorvägskörning, insida')
end
Diff=Vinst-Forlust;
hold on
plot(L,Forlust,'r','linewidth',4)
plot(L,Vinst,'linewidth',4)
plot(L,Diff,'g','linewidth',4)
ylabel('Effekt [W]')
xlabel('Längd [m]')
xlim ([0.0, 0.1])
ylim ([-100, 100])
legend('Effekt förlust','Effekt ifrån TEG','Nettovinst' )

% UTSIDA
% Beräknar nya effektivitetsökningar för utsidan, dessa används sedan
% för att beräkna vinsten som fås med hjälp av flänsar.
for i=1:length(L)
m=((h2*P)/(k*Ac))^(1/2);
M=Theta*(h2*P*k*Ac)^(1/2);
CaseAQF(i)=M*((sinh(m*L(i))+(h2/(m*k))*cosh(m*L(i)))/(cosh(m*L(i))+(h2/(m*k))*sinh(m*L(i))));
eff2(i)=CaseAQF(i)/(h2*Ac*Theta);
end

```

```

% På samma sätt som ovan beräknas effekten, om den går över maximala
% effekten som elementet kan avge kommer effektmax att anges.
for i=1:length(eff)
Vinstute(i)=eff(i)*ata*Peltiereffekt;
if Vinstute(i)>=Effektmax
    Vinstute(i)=Effektmax;
end
end

% CD för olika typer, dvs ett måttetal för hur stor kraftförlusten
% blir till följd av flnsarnas luftmotstånd.
Cdfram=2;
CdsidaS=0.031/((Re)^(1/7));
bredd=0.001;

% Räkna ut för varje enskild körtyp hur stor kraftförlusten blir.
i=1;
for i=1:201
    hojd=0+0.001*(i-1);
    Afram=hojd*bredd;
    FframS=Cdfram*1/2*rho*((V/3.6)*1.3)^2*Afram;

    langd=0.04;
    Asida=langd*hojd;
    FsidaS=CdsidaS*1/2*rho*((V/3.6)*1.3)^2*Asida;

    Ftotal(i)=FframS+FsidaS;
    Effektforlust=Ftotal*V*8 ; %Ty antal flänsar är 8 st
end
% Plottar resultatet av vinst, förlust samt differens.
subplot(1,2,2)
if j==1
    title('Stadskörning, utsida')
elseif j==2
    title('Landsvägskörning, utsida')
else
    title('Motorvägskörning, utsida')
end
hold on
plot(L,Effektforlust,'r','linewidth',4)
plot(L,Vinstute,'linewidth',4)
Diffute=Vinstute-Effektforlust;
plot(L,Diffute,'g','linewidth',4)
ylabel('Effekt [W]')
xlabel('Längd [m]')
xlim ([0.0, 0.1])
ylim ([-100, 100])
legend('Effektförlust','Effektifrån TEG','Nettovinst')
end
set(legend,'FontSize',10)

```

## Referenser till Appendix B

- [1] Incropera, Frank P. DeWitt, David P. Bergman, Theodore L. Lavine, Adrienne S.(2012). Principles of Heat and Mass Transfer. United Kingdom. John Wiley & Sons. ISBN : 978-0-470-64615-1

## C. Tabeller

Den data som används vid beräkningar är hämtade från följande tabeller.

### C1. Reynoldstal under bilen

Reynoldstalen i Tabell C.1 beräknas i Appendix A.

Typ av körning	Medelhastighet	Reynoldstal
Stadskörning	19,0 km/h	$8.6 \cdot 10^5$
Landsvägskörning	62,6 km/h	$2.8 \cdot 10^6$
Motorväg	110 km/h	$5 \cdot 10^6$

### C2. Egenskaper i avgasröret

Tabelldata är från *Heat and Mass Transfer* [1]

Körtyp	Massflöde [g/s]	Temperatur [°C]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [kg/(s·m)]	Prandtl
Stad	10	700	0.35	$420 \cdot 10^{-7}$	0.726
Landsväg	20	670	0.36	$415 \cdot 10^{-7}$	0.723
Motorväg	40	790	0.32	$440 \cdot 10^{-7}$	0.727

### C3. Värden på bränsleenergi för bensin och diesel

Tabelldata från *Gunnar Latz* [2].

Bränsletyp	Bränsleenergi (kJ/kg)	Densitet (kg/l)	Bränsleenergi (kJ/l)
Bensin	42800	0,84	35952
Diesel	42000	0,76	31920

## Referenser till Appendix C

[1] Incropera, Frank P. DeWitt, David P. Bergman, Theodore L. Lavine, Adrienne S.(2012). Principles of Heat and Mass Transfer. United Kingdom. John Wiley & Sons. ISBN : 978-0-470-64615-1

[2] Latz Gunnar Doktorand Chalmers Tekniska Högskola. (2015-03-03).Handledare. Institution för Tillämpad Mekanik. Avdelning för Förbränningsteknik.

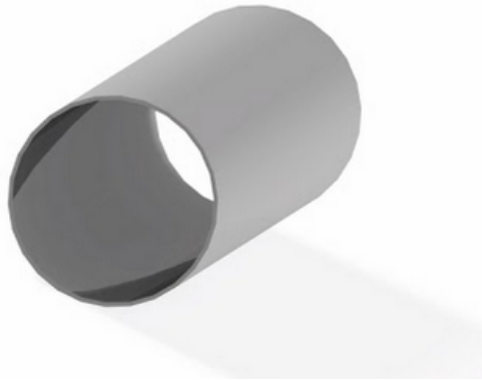
## D. CFD

Resultaten har analyserats i ANSYS 2D och ANSYS 3D. Resultaten kommer att delas upp i yttre och inre röргеometrier. Resultaten visar varje koncept för sig med analyserade värden för tryckfall och tempreaturfall givna nedanför. Samtliga resultat är jämförda med en referens som är ett rakt rör utan flänsar.

För 3D och 2D undersökningar har olika referensvärden använts:

Tryckfall 3D: 50 Pa      Tryckfall 2D: 30 Pa

Tempfall 3D: 2 °C      Tempfall 2D: 23 °C



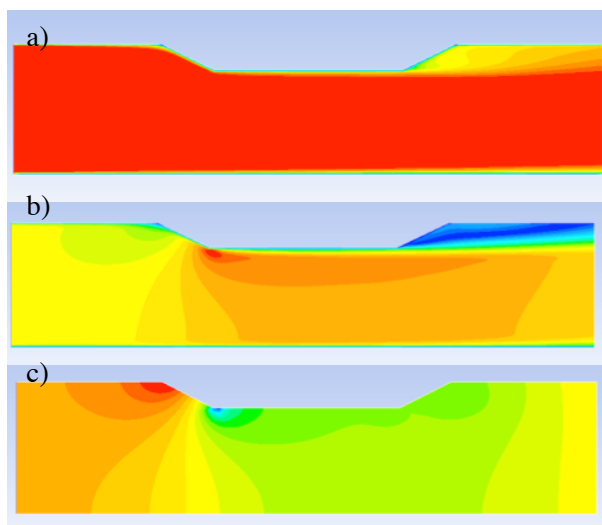
*Figur D.1 - Referenslösning – rakt, opåverkat rör.*

## Tillplattat rör

Det tillplattade konceptet skulle kunna vara ett rör med en tillplattad del för att kunna applicera en generator. För att få bättre värmeöverföring skulle detta kunna kombineras med flänsar.



Figur D.2 - CAD-modell för tillplattat rör



Figur D.3 – a) Temperaturprofil – Där rött är varmaste området.

**Temperaturfall: 36°C**

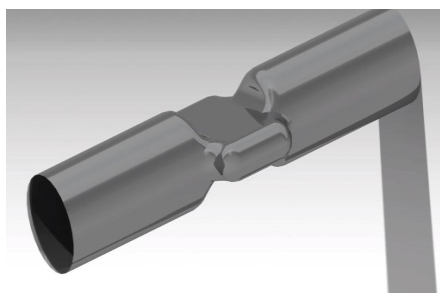
b) Hastighetsprofil – Där röd färg indikerar högst hastighet och således höga nusslet-tal

c) Tryckprofil – Där rött indikerar höga tryck och vi ser att högst tryck återfinns vid insvängningen.

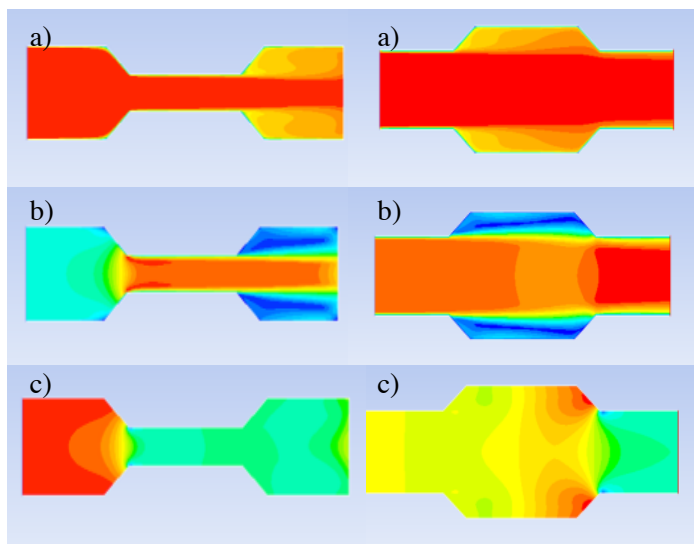
**Tryckfall 190 Pa.**

### Dubbel-tillplattat Koncept

Det dubbeltillplattade konceptet är då ett rör plattats till från båda sidor för att få en smalare passage för fluiden att strömma igenom och samtidigt få två ytor där generatorer kan appliceras, ett på ovansidan och ett på undersidan. Tanken är att den tillplattade delen ska ha samma genomsnittsarea som det ursprungliga röret för att få mindre tryckfall. Eftersom en 2D analys av en sådan här modell inte ger något resultat som går att använda kommer värdena ifrån 3D – analys.



Figur D.4 - CAD-modell för tillplattat rör



Figur D.5 – a) Temperaturprofil – Rött indikerar varmaste området och vi ser att värmen inte hänger med vid svängar.

**Temperaturfall: 54°C**

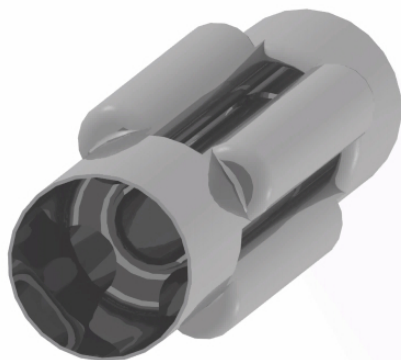
b) Hastighetsprofil – Hastigheten ökar när det blir smalare och minskar vid utbredning

c) Tryckprofil – Trycket är högst precis innan det smalnar av vid alla tillfällen

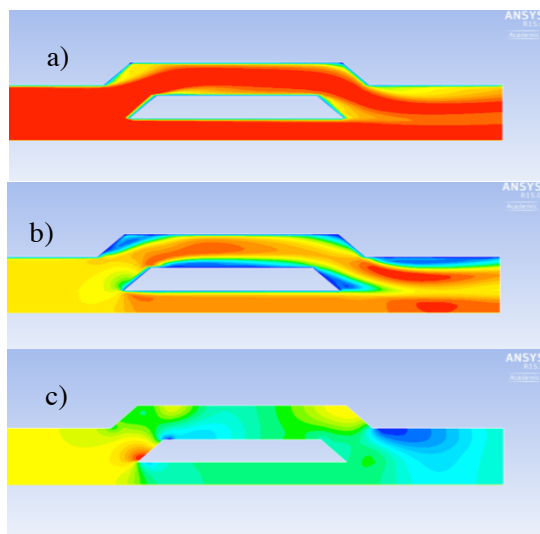
**Tryckfall 508 Pa.**

## Symmetriskt Koncept

Detta koncept är tänkt som ett rör som delar upp sig i två eller fler rör med olika placering i rummet. Detta ska ge ökad flödesvariation samt ge möjlighet för någon sorts kylning mellan rören.



Figur D.6 - CAD-modell för symmetriskt rör



Figur D.7 – a) Temperaturprofil – Värmen sprider sig inte ut mot väggarna.

**Temperaturfall: 51°C**

b) Hastighetsprofil – Hastigheten är högst i en strimma i mitten av röret som följer tempereturprofilen

c) Tryckprofil – Trycket är högst på framsidan av hålet och lägst mot väggen bakom.

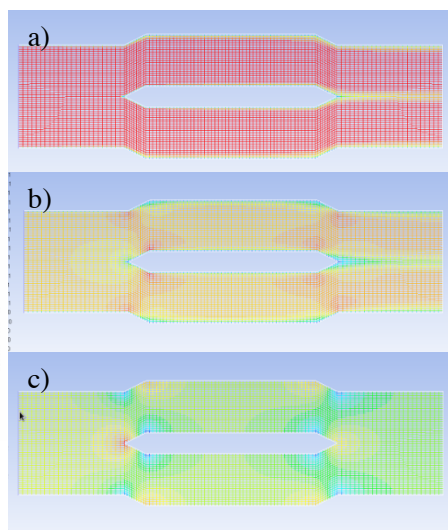
**Tryckfall: 360 Pa**

### Uppdelat i två rör **Koncept:**

Röret delas upp i två rör för att få fler ytor att kunna sätta Peltierelement.



FigurD.8 - CAD-modell för två rör



Figur D.9 – a) Temperaturprofil – Temperaturen följer ganska bra men är ändå lägst längs väggarna.

**Temperaturfall: 38°C**

b) Hastighetsprofil – Hastigheten är högst kring hörnen

c) Tryckprofil – Vi får ett tryckmax precis där rören delar upp sig i två

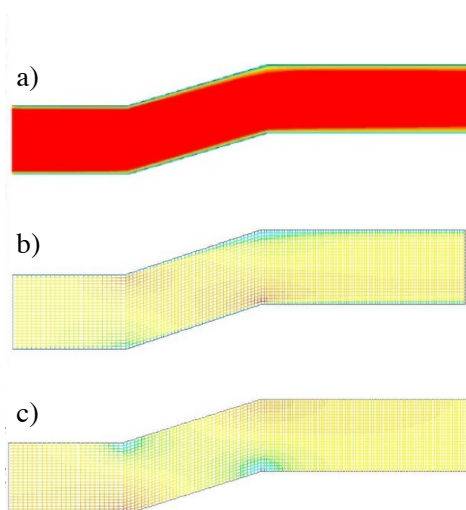
**Tryckfall: 87 Pa**

### Krökt Konzept:

Detta koncept går ut på att fluiden ska slå emot den sneda väggen och på så sätt ge en bättre värmeöverföring på den väggen, utan att ge ett stort tryckfall.



Figur D.10 - CAD-modell för krökt rör



Figur D.11 – a) Temperaturprofil – Värmen trycks mot den undre kanten

**Temperaturfall: 24°C**

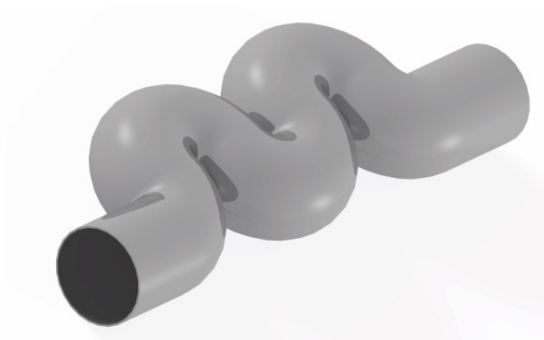
b) Hastighetsprofil – Fås ett maximum vid nedre, bakre hörnet medan det fås en vak ovanför denna

c) Tryckprofil – Motsatt effekt till hastigheten då det blir lägst tryck där det är högst hastighet.

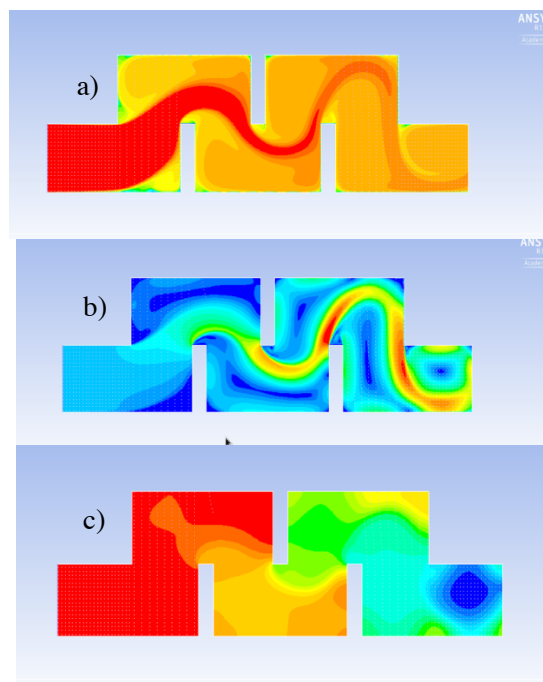
**Tryckfall: 53 Pa**

## Spiralrör Koncept

Efterliknar en värmeväxlare då så många passager som möjligt eftersträvas och kunna stanna upp fluiden för att kunna ta vara på energin. Denna eliminerats dock till följd av för stort anbringt tryckfall.



Figur D.12 - CAD-modell för spiralrör



Figur D.13 – a) Temperaturprofil – Värmen minskar radikalt och det är markant varmast just i en strimma i mitten av röret.

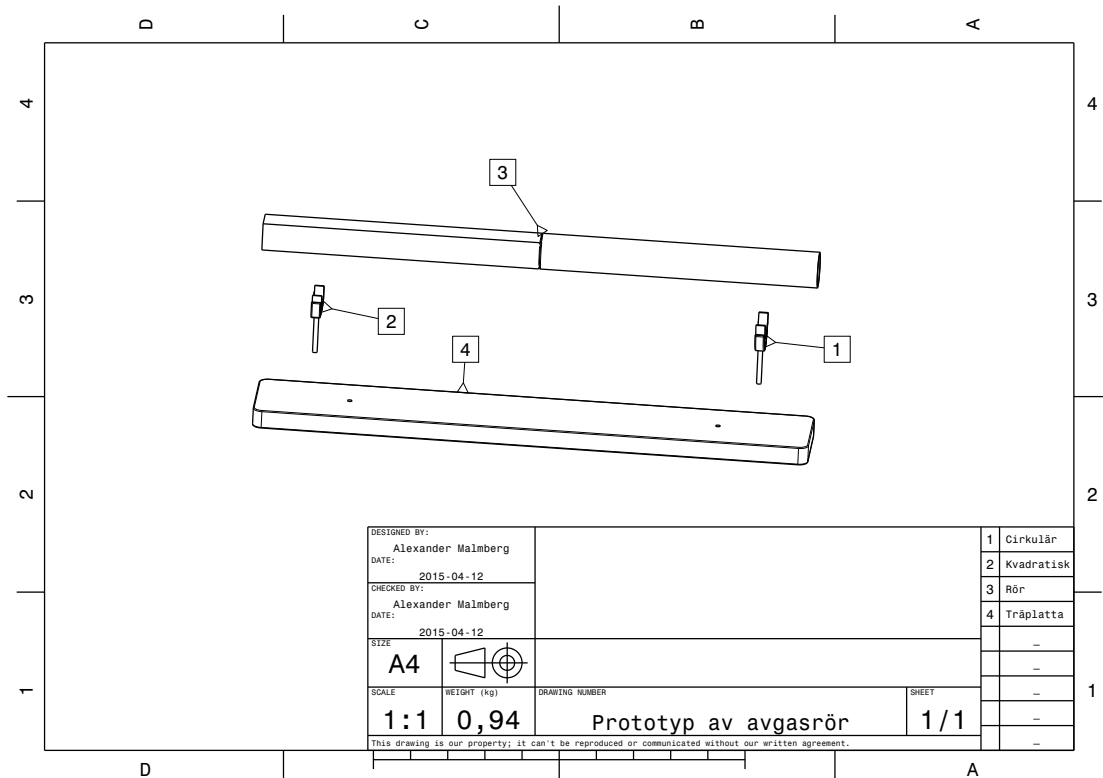
**Temperaturfall: 125°C**

b) Hastighetsprofil – Hastigheten är högst vid röd färg och till följd av mycket turbulens är denna högst i slutet av röret.

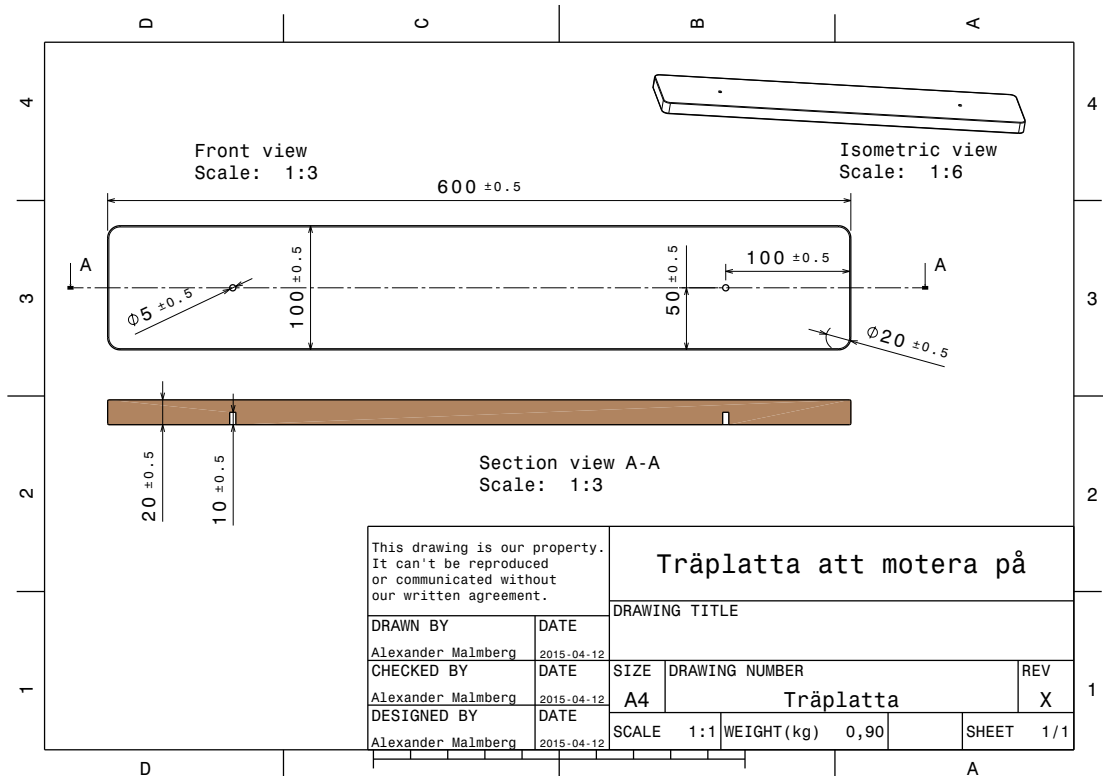
c) Tryckprofil – Tydlig tryckförändring kan ses längs röргеometrin.

**Tryckfall 19000 Pa.**

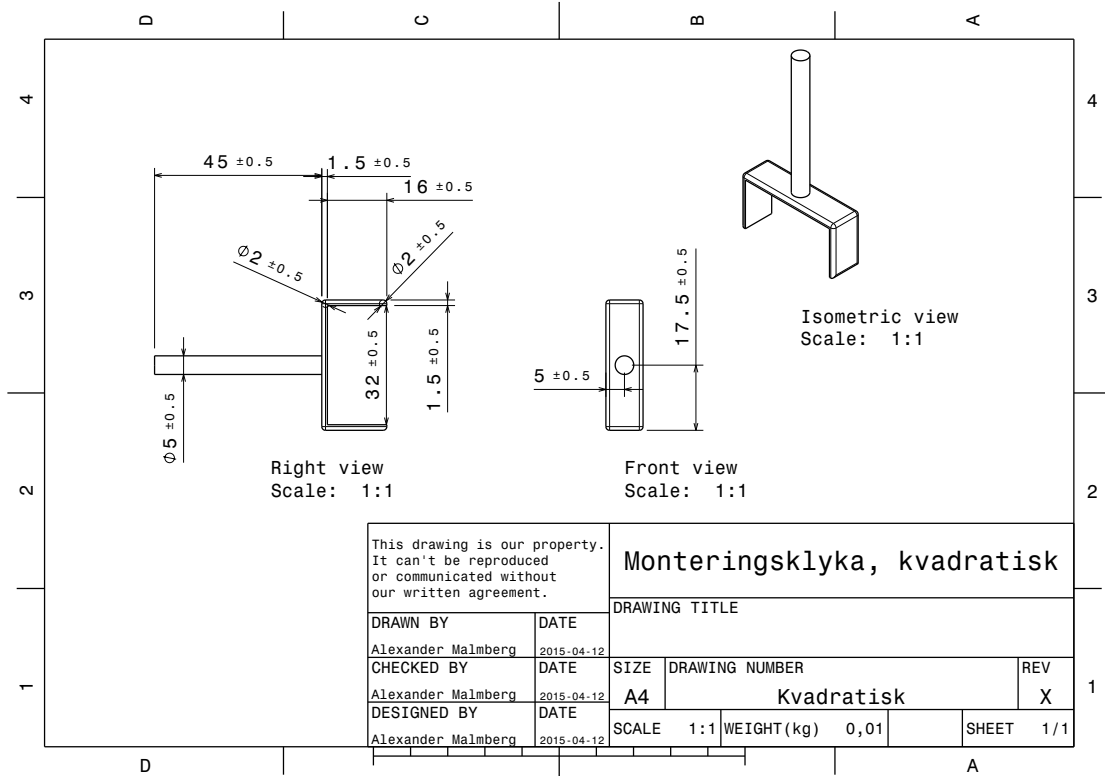
# E. Ritningar



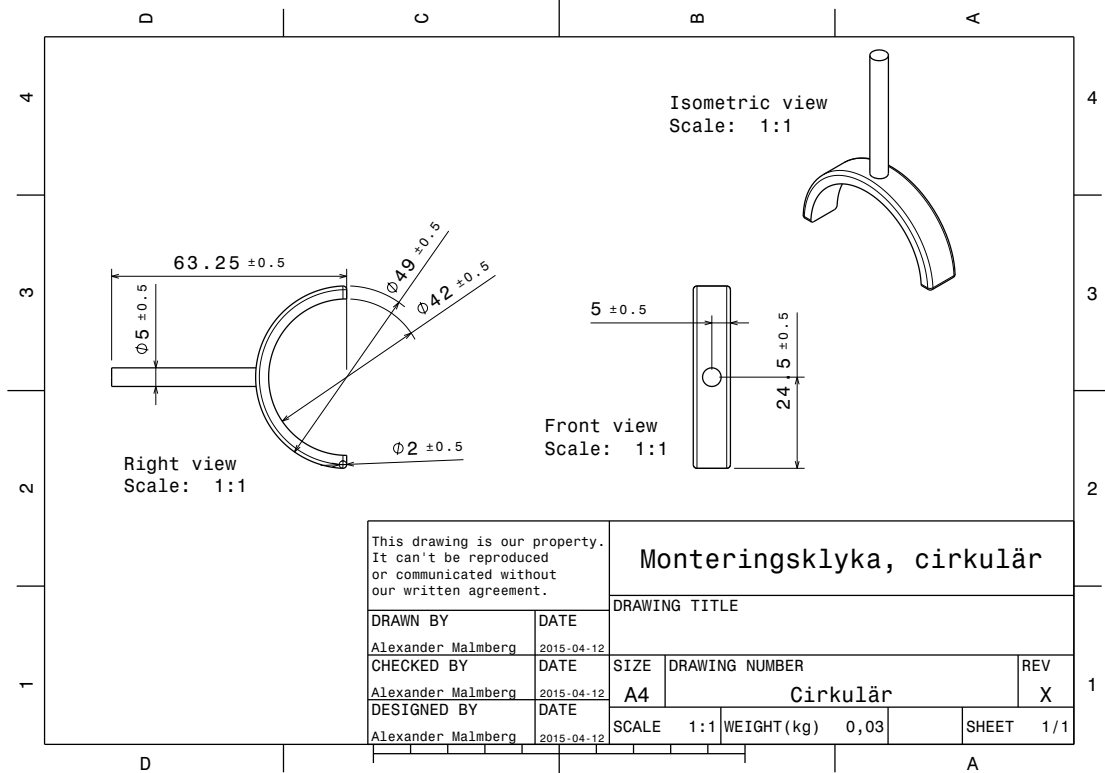
Figur E.1 – Konceptritning



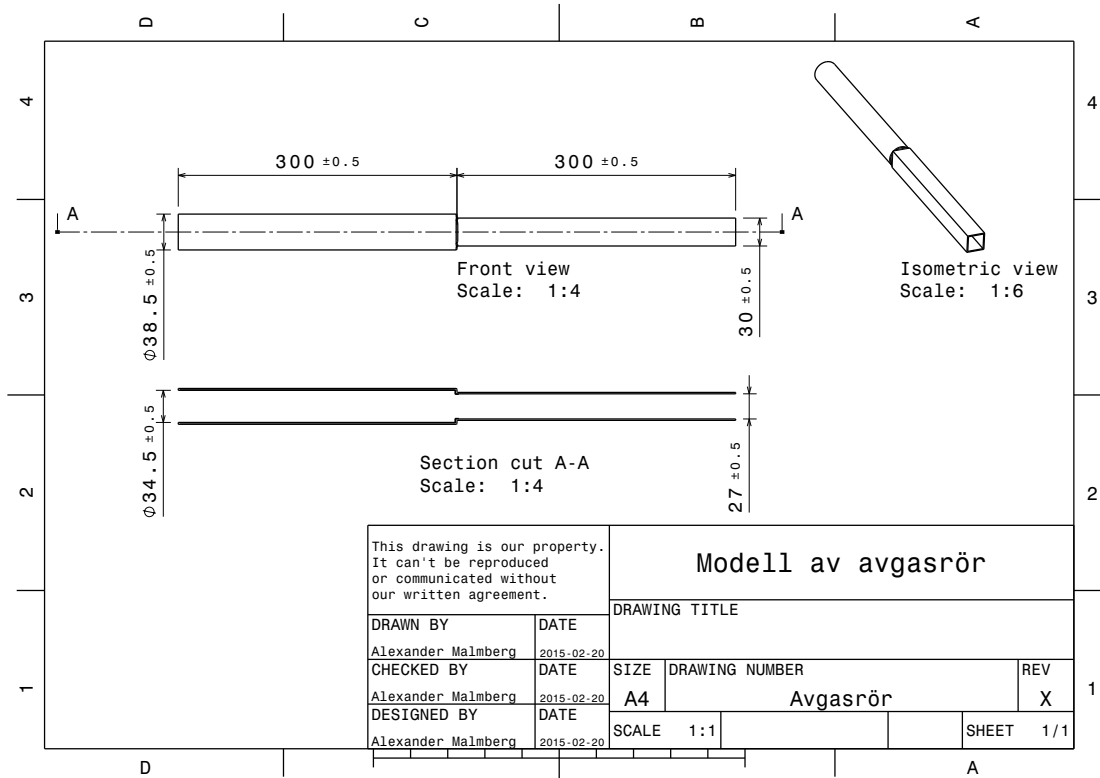
Figur E.2 – Detaljritning för plattan



Figur E.3 – Detaljritning för den kvadratiske klykan



Figur E.4 – Detaljritning för den cirkulära klykan



Figur E.5 – Detaljritning för röret

## F. Intervjuer

### F1. Intervju med Olle

2015-04-24 [1]

---

#### **Hur det fungerar att ha flera olika, - Hur mycket mer energi kan man i praktiken få ut, är det dubbelt? Parallell vs. seriekoppling?**

Vi hade sämre resultat med parallell- detta är rimligt då de då ej belastar varandra. Däremot hade parallell fungerat lika bra om vi haft samma temperatur. Har vi olika temperatur kommer, vid parallell-koppling Peltierelementen alltid att påverka varandra.

Säg att de jobbar vid samma temperatur, spelar inte parallell/seriekoppling någon roll. Har vi olika temperatur kommer serie vara bättre, annars belastar de varandra.

Vid många seriekopplade eller parallell-kopplade kan elementen oftast inte jobba optimalt ty temperaturskillnader. Eftersom varje temperatur ger upphov till en viss spänning och en viss ström. Det finns även grafer som visar hur den optimala ström/spänningförhållandet ser ut för att kunna få ut så mycket effekt som möjligt.

Ström är linjärt beroende till spänning. Effekten blir som andragradskurvor när man plottar den mot strömmen. En regel man kan använda är att man ska ha hälften så mycket spänning av det maximala som man kan få ut. Dvs. halva spänningen utav en öppen krets. Detta kan man mäta genom att prova spänningen över ett obelastat element och ta hälften av detta. Spänningen kan sedan uppnås genom att använda rätt resistans. Lika stor resistans utanför kretsen som elementets inre resistans ger optimal effekt.

Inre resistanser är även viktiga att ta hänsyn till. Resistansen (inre) är svår att mäta då den är väldigt tempberoende. Kan göras med ac-puls då man undviker seeback-effekten. Hälften av den maximala spänningen vill man ha med hjälp av resistansen.

Kan även mäta maximal spänning vid öppen krets (dvs inget kopplat till elementet förutom voltmeter) och sedan med potentiometer (justerbar resistans) variera resistansen tills man får hälften av den maximala spänningen. Där har man störst effekt och lika stor resistans som den inre resistansen.

Bäst hade varit att varje element jobbar med sin egen generator, men detta gör man ofta inte på grund av att det blir för dyrt. Istället används några element i klump vid varm plats kopplat till en dc-generator, och några i klump vid kallare kopplat till dc-generator.

#### **Hur är det med kylning? -spelar inte kylning någon roll?**

Man bör ha ytförstoring på både ut och insida! Olle rekommenderade att prova med att sätta flänsar på insidan av röret då det troligtvis är olika temperatur precis under elementet och precis bredvid.

**Bättre att ha så varm temperatur som möjligt eller viktigare med stort delta T?**

Ja, det spelar roll men det beror på vilket halvledarmaterial som vi använder. Man kan till och med få en lägre effekt vid för högt T. Vid högre temp ökar även resistiviteten

Finns dock material som blir bättre o bättre vid högre temp, men beror på material och vi har ett som blir för högt. Vårt är bättre ju lägre temp det är eller runt 70C.

Detta är värt för oss att kolla upp och se vilket sorts element vi verkligen skall använda.

**Spelar det någon roll vid vilken temperatur som skillnaden är vid?**

Ja! Se övre svar!

## **F2. Intervju med Anders Palmqvist**

2015-05-07 [2]

---

### **Berätta om din forskning inom termoelektriska element?**

Anders arbetar mestadels med att ta fram nya termoelektriska material för mellan 200 och 1000 grader Celsius.

Anders har även samarbetat med Volvo, TermoGen och Alfa Laval om värmeåtervinning ifrån lastbilar. Industrin har då stått för CFD-beräkningar medan Anders grupp på Chalmers har jobbat med själva materialen.

Det finns i grunden tre olika fysikaliska egenskaper som avgör ZT-talet. Det ena är Seebeck-effekten och de andra är elektrisk och termisk ledningsförmåga. Svårigheten med dessa är att de sällan går hand i hand utan snarare är motsatser. Man söker ett material med låg termisk ledningsförmåga men med hög elektrisk ledningsförmåga.

Ett sätt som man arbetar på idag är att försöka skapa material med hög elektrisk ledningsförmåga och en sämre termisk. Man arbetar därför mycket med den inre strukturen hos materialen för att få till en lämplig kristallstruktur. Vissa typer av strukturer minimerar nämligen vibrationer genom att ha svaga bindningar, vilket i sig förhindrar termisk ledningsförmåga medan det ej hämmar den elektriska. Självklart är det här mycket viktigt vilket grundämnen man använder. Väldigt förenklat kan man säga att man utgår ifrån ett grundämne med god termisk ledningsförmåga, dock ej för bra då detta medför en väldigt dålig seebeck-effekt, samt god elektrisk ledningsförmåga. Man försämrar sedan den termiska ledningsförmågan genom att manipulera strukturen på kristallen. På detta sätt bibehåller man den goda elektriska ledningsförmågan.

### **Vad för material används idag?**

För att kunna tillverka bra material gäller det att utgå ifrån rätt grundämnen. Dessa blandar man sedan för att få till lämpliga material. De som används mest idag och som också är bäst i dagsläget är så kallade halvledare som är kraftigt dopade. Typiskt väljs ämnen ifrån andra halvan av periodiska systemet. Ett exempel är Kisel. Ett färdigt material som används idag är Vismuttelurid, detta är nästan det enda som finns att köpa kommersiellt i dagsläget.

Vismuttelurid utvecklades redan på 40- och 50-talet. Man upptäckte då att tunga element får en lägre fononhastighet vilket bidrar till en sämre termisk ledningsförmåga, material med mer komplicerade kristallstrukturer hade samma effekt. Man upptäckte även att om man blandar två olika grundämnen med stor masskillnad leder detta till lägre termisk ledningsförmåga. Vismut-telurid uppfyller samtliga av dessa, men är endast stabil för relativt låga temperaturer.

Det var inte förrän in på 90-talet som det skedde några egentliga moderna framsteg inom termoelektroniken. En person vid namn Glen Slack började då fundera på ännu mer avancerade kristallstrukturer och kom på ett koncept som kallades "rattle scattering" vilken beskriver materialstrukturer som leder värme som ett glas men elektricitet som en kristall. Detta är något som Chalmers har blivit väldigt duktiga på i efterhand och har bland annat uppfunnit ett mycket bra N-dopat material för höga temperaturer så som flygplansmotorer.

Andra sätt att arbeta fram nya material på är att skapa korngränser mellan olika material. På detta sätt kan man eventuellt preferentiellt störa den termiska ledningsförmåga men bibehålla den elektriska. Det finns även intressanta resultat med nanotrådar. Dock blir dessa material så små att de är svåra att använda i dagsläget och man måste kunna göra om dem till bulkmaterial för att de skall fungera för storskaligt kommersiellt bruk. För kommersiella tillämpningar är det viktigt att kunna skapa sina material i större skala. Det är därför av vikt att kunna göra sina material både bra och billiga för att de skall kunna bli kommersiella. Detta öppnar upp för att exempelvis använda billigare material, även om de inte har lika bra egenskaper.

### **Vilka material arbetar du med?**

Anders grupp arbetar i dagsläget mycket med klatratstrukturer och mestadels utav materialen Barium, Gallium och Germanium. Dessa går att byta ut mot andra grundämnen, men självklart inte till vad som helst.

En metod som Anders har börjat använda sig av är en metod som känd för applikationer med kisel. Smält material dras då upp ur ett kar för att bilda stora kristaller. Det är av stor vikt att materialet har rätt stelningsegenskaper för att denna metod skall kunna användas. Kristallerna kan sedan sågas och slipas för att sedan, med hjälp av teknisk apparatur, kunna mäta "figure of merit".

Anders har tidigare arbetat med katalysatorer. Eftersom dagens motorer har en högre förbränningseffektivitet ställer detta krav på katalysatorerna. För att kunna genomföra bra katalysatoriskt arbete måste det vara varmt. Att placera termoelektriska material konkurrerar därför med katalysatorns plats och värmen på avgaserna.

En metod som användes är att skapa en återvinningsventil för avgaserna då man recirkulerar en del av avgaserna till motorn igen, för att bland annat minska NO<sub>x</sub>-emissioner. Dessa återkopplingsvägar hade varit ett perfekt ställe att placera termoelektriska element. Självklart kan dock bara en viss del av avgaserna återkopplas för att inte skapa för stort mottryck och är i dieselmotorer begränsad av ackumulering av partikelstoff från avgaserna i motorn.

### **Vad anser du är de största svårigheterna inom användning av TEG i avgasåtervinning?**

Att få alla delkomponenter till en väl optimerad helhet.

#### *Materialmässigt:*

Högre ZT per krona. (kostnad mot performance)

Stabiliteten på materialet som inte faller sönder eller ändrar struktur.

Kontakter mellan olika material ger upphov till mycket förluster.

### **Vilka är de främsta områdena för förbättring inom TEG?**

Materialen kommer först! Sedan kan folk börja göra mer moduler.

### **Hur tror du att det ser ut om 10 år?**

Det kan definitivt finnas en hög användning av termoelektriska element om några år, dock går det inte att svara på hur många. Dock är Anders inte helt övertygad utan det krävs mer forskning, dock finns det ingenting idag som tyder på att det finns någon gräns på vad termoelektriska element kan åstadkomma. Fördelarna med elementen är många, till exempel att de inte kräver så mycket underhåll. Redan idag bör det även vara möjligt att applicera termoelektriska element i fordon, men för att det ska slå ordentligt måste man få till bättre material som gör att man tjänar mer på det.

Enligt Anders beror det mycket på vilka nischer som blir fördelaktiga för termoelektronik i samhället. Om bensinpriset går upp så ökar efterfrågan och intresset.

### **Referenser till Appendix F**

[1] Höglom Olle Doktorand Chalmers Tekniska Högskola. (2015-04-24). Institution för Kemi och Kemiteknik. Avdelning för Kemisk Reaktionsteknik.

[2] Palmqvist Anders Professor Chalmers Tekniska Högskola. (2015-05-06). Vice styrkesområdesledare för materialvetenskap. Institution för Kemi och Kemiteknik. Avdelningen för Teknisk Ytkemi.

# G. Tekniskdata för Peltierelementet

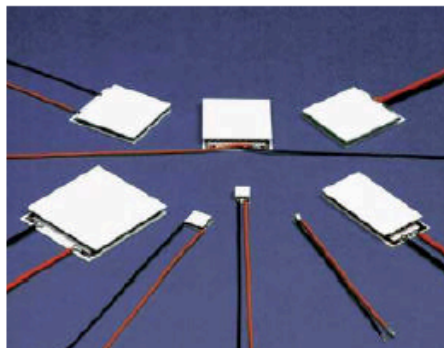


Thermoelectric  
Cooler

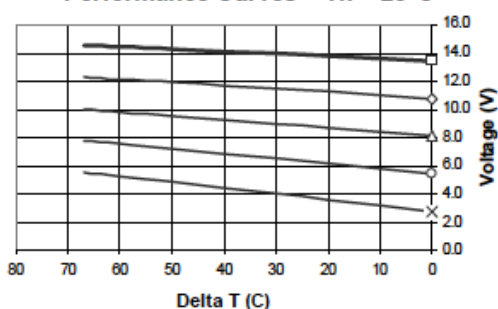
HT3-12-30

## Performance Specifications

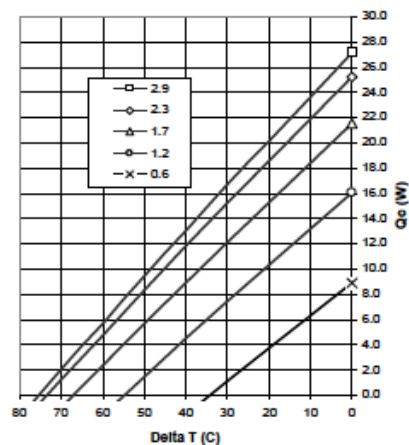
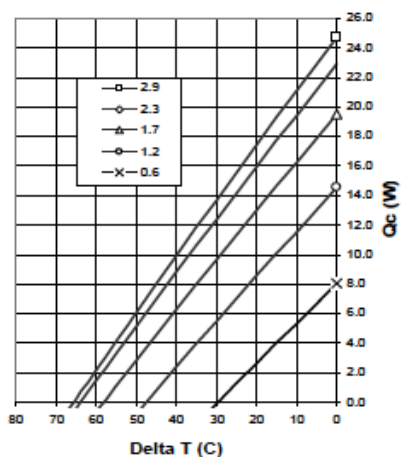
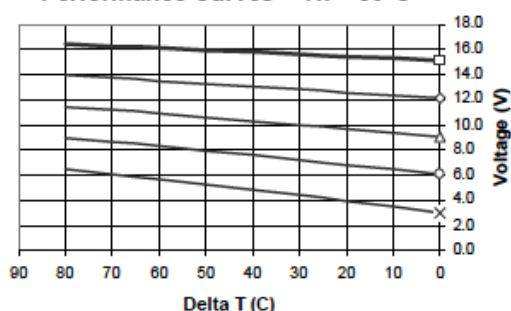
Hot Side Temperature (°C)	25 °C	50 °C
Qmax (Watts)	24	27.16
DeltaTmax (°C)	63	77
I <sub>max</sub> (Amps)	2.8	2.884
V <sub>max</sub> (Volts)	14.4	16.37
Module Resistance (Ohms)	4.65	5.24



### Performance Curves – Th = 25°C

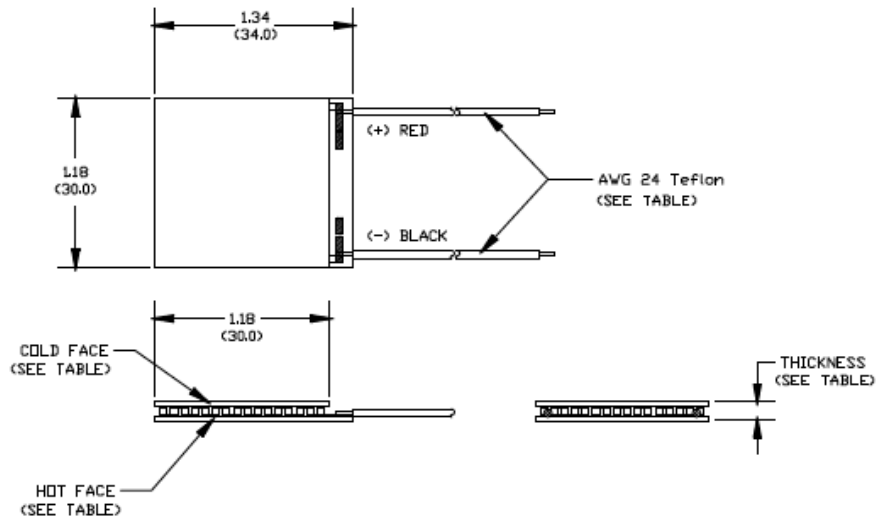


### Performance Curves – Th = 50°C



Figur G.1 - Tekniskdata från Elfors hemsida, sida 1 [1].

**Mechanical Drawing**



Ceramic: Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)  
Solder Construction: 271°C SnSb

**Thickness and Surface Finish Specifications**

Suffix	Thickness	Flatness & Parallelism	Hot Face	Cold Face	Lead Length
NONE	0.126" +/- 0.015"	0.002" / 0.0035"	Lapped	Lapped	6.0"
-T1	0.126" +/- 0.001"	0.001" / 0.001"	Lapped	Lapped	6.0"
-T2	0.126" +/- 0.0005"	0.0005" / 0.0005"	Lapped	Lapped	6.0"

**Operation Tips**

- Max Operating Temperature: 200°C
- Do not exceed I<sub>max</sub> or V<sub>max</sub> when operating module.
- Please consult Melcor for moisture and corrosion protection options

Figur G.2 - Tekniskdata från Elfas hemsida, sida 2 [1].

**Referenser till Appendix G**

[1] Elfa. Melcor HT 3-12-30\_EN.pdf. (2015-05-18).

Tillgänglig: [https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/stMELCOR\\_HT\\_3-12-30\\_EN.pdf](https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/stMELCOR_HT_3-12-30_EN.pdf)  
(Hämtad: 2015-05-18)



# **Termoelektrisk värmeåtervinning från fordonsavgaser**

En studie om elgenerering med Peltierelement

Med dagens rådande miljöhot som bakgrund har en undersökning genomförts för att analysera möjligheten av att applicera termoelektriska generatorer inom fordonsindustrin. Projektet genomfördes på institutionen för Tillämpad Mekanik på Chalmers Tekniska Högskola under våren 2015. Undersökningsmetoderna var simuleringar, experiment och beräkningar. Efter avslutat projekt kunde konstateras att användandet av termoelektriska generatorer i dagsläget är svårt att genomföra på ett lönsamt sätt. Med ökad forskning inom området, framförallt för att finna nya material, har dock metoden i framtiden en stor potential.