Schlussbericht Teil 2:

Aufgrund der immer höher werdenden Kühlanforderungen in elektronischen Systemen wurden vom ZFW Stuttgart im Rahmen des CeCaS-Projektes unterschiedliche Wärmespreizer und -leiter sowie weitere innovative Kühlmethoden untersucht und deren Eignung als Kühlung für einen Central Car Server überprüft. Die einzelnen Ergebnisse wurden im Folgenden chronologisch nach Wärmespreizer/-leiter/Kühlmethode aufgelistet.

Autor: David Attila

Stuttgart, August 2026

Inhalt

Pulsating Heatpipes (PHPs): 3

Variation der Kühlfläche und Vergleich der Performance mit Al-Platte 5

Untersuchung eines kleineren PHP-Modells 8

Untersuchungen mit Thermokamera 10

Validierung des Versuchsaufbaus 12

Variation der Füllmenge und Inklination zweier neuer PHP-Modelle 13

Variation der Kanalgeometrie von drei weiteren PHP-Modellen 17

Vapour Chamber (VC): 21

Variation der Inklination zweier VC-Modelle mit Wasserkühlung 21

Untersuchung der Temperaturhomogenität von luftgekühlten VCs ohne Rippenkühlung 23

Untersuchung der Temperaturhomogenität von luftgekühlten VCs mit Rippenkühlung 25

Weitere innovative Kühlmethoden: 27

Folienkühlkörper: 27

Druckgußluftkühlkörper: 30

Messungen am AP2-Gesamtdemonstrator: 31

Pulsating Heatpipes (PHPs):

Unterschiedliche PHP-Modelle wurden als erste Möglichkeit zur Wärmespreizung und -transport der Verlustleistungen im Central Car Server untersucht. Dazu wurde eine Messmethode zur Bestimmung des thermischen Widerstandes einer PHP entwickelt.

Der thermische Widerstand ist eine charakteristische Größe zur Beurteilung der thermischen Performance eines Bauteils im Hinblick auf dessen wärmeleitenden und –abführenden Eigenschaften. Dieser berechnet sich aus dem Quotienten des Temperaturunterschiedes zwischen Wärmequelle und -senke und dem abgeführten Wärmestrom im stationären Zustand. Dieser wird definiert als Temperaturänderung von 0,2 K innerhalb von 300 Sekunden nach ASTM D5470. Der Wärmestrom kann über die Temperaturdifferenz des Kühlfluids am Ein- und Ausgang des mit der PHP verbundenen Kühlkörpers, sowie über dessen Stoffeigenschaften bestimmt werden. Zur Messung des Wärmestroms wird eine hohe Messgenauigkeit bei der Temperaturmessung benötigt. Diese wurde über eine Temperaturdifferenzschaltung realisiert. Somit können kleine Temperaturdifferenzen von 0,01 K aufgelöst werden. Die Thermoelemente wurden in dafür vorgesehene Strömungsgleichrichter-Messrohre eingesetzt. Für die Kühlung wurde ein Thermostat und eine zusätzliche Pumpe zur Druckregelung eingesetzt. Die Temperaturdifferenz zwischen Wärmesenke und -quelle wurde über mehrere Thermoelemente an der Wärmesenke und -quelle bestimmt. Über eine Heizpatrone, die in einen Kupferblock eingesetzt wurden, sowie der Kopplung eines weiteren Kupferblocks an den Fluidkreislauf, wurden definierte Heiz- und Kühlflächen realisiert. Mithilfe von Druckfedern wurde ein definierter Anpressdruck der Heiz- und Kühlblöcke realisiert. Die Kupferblöcke wurden zusätzlich über Isolierband thermisch isoliert sowie durch die Verwendung von PEEK-Schrauben thermisch vom Rest des Teststandes entkoppelt. Zur besseren thermischen Kontaktierung an die PHP-Modelle wurden Graphitfolien mit nachgemessenem thermischem Widerstand über einen ZFW TIM-Tester zwischen die Kupferblöcke und die PHP eingesetzt. Die PHP wurde durch eine PTFE-Platte als Auflagefläche vom Rest des Teststandes thermisch entkoppelt. Für die Datenerfassung wurde ein LabVIEW-Programm geschrieben.

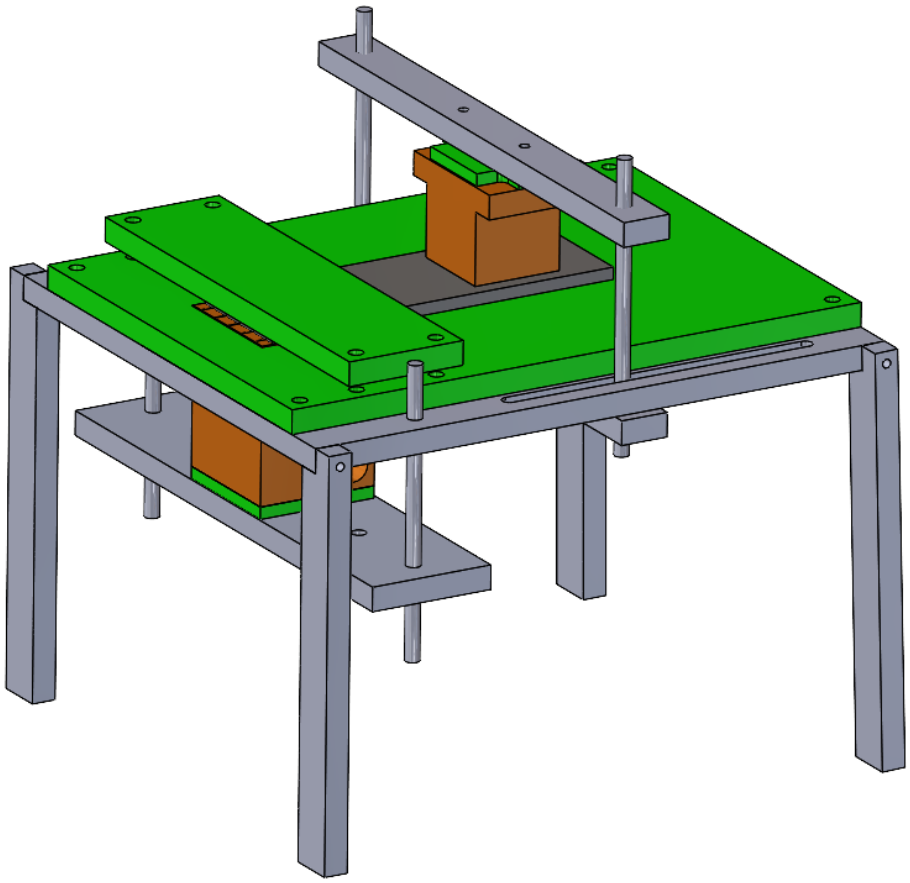

Abbildung 1: Schematischer Aufbau Teststand

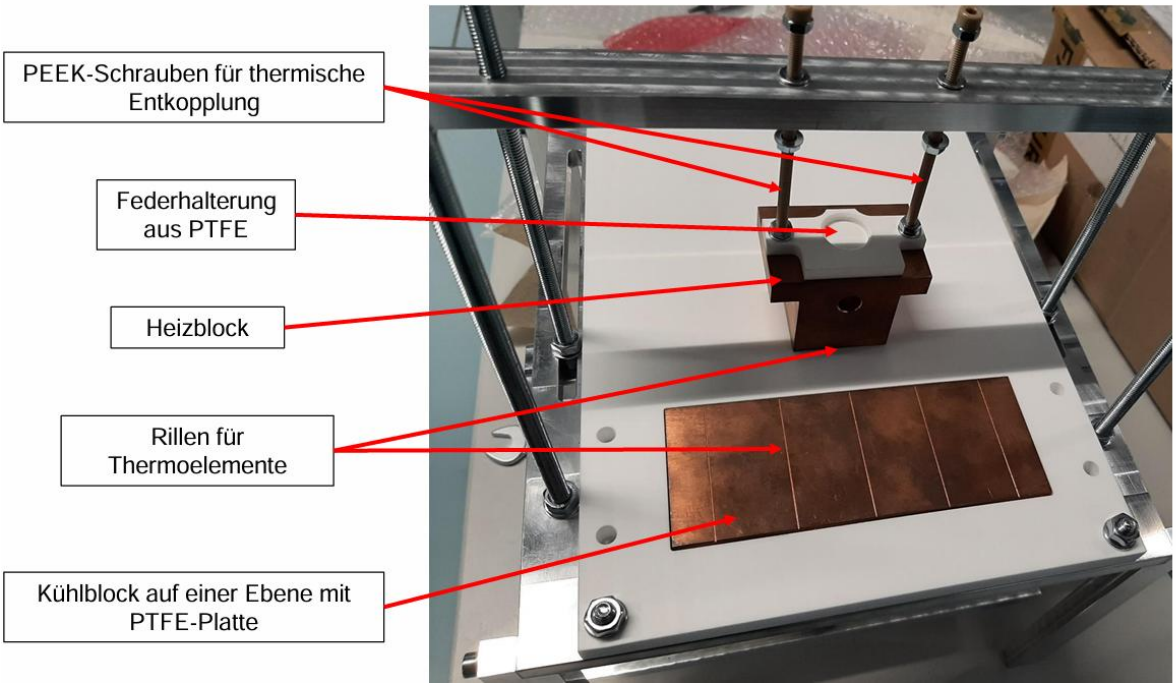

Abbildung 2: Aufbau Teststand

In Abbildung 1 und 2 ist der Aufbau des Teststandes zu sehen.

Variation der Kühlfläche und Vergleich der Performance mit Al-Platte

Im Folgenden wurde ein PHP-Modell bei unterschiedlichen Kühlfluidtemperaturen und Verlustleistungen untersucht. Anschließend wurde die PHP bei verringerter aktiver Kühlfläche charakterisiert. Daraufhin wurden die Ergebnisse mit denen einer Aluminiumplatte mit denselben Dimensionen verglichen. Folgende Randbedingungen wurden für die Messreihen definiert:

Variation der Verlustleistung:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C, 65 °C, -20 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf der Heizseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, Bündig mit Rand der Kaltseite über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 80 W, 100 W, 120 W, 140 W, 150 W

-Lage: horizontal

Variation der geometrischen Positionierung des Kühlblocks:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C, 45 °C, -10 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf der Heizseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 15 mm, Bündig mit Rand der Kaltseite über die gesamte Breite der PHP, 15 mm Überlappungslänge der PHP mit dem Kühlblock

-Verlustleistung: 80 W, 100 W, 120 W, 140 W, 150 W, 200 W

-Lage: horizontal

Wiederholung der Versuchsreihe mit Aluplatte geometrisch gleicher Maße:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C, 45 °C, 5 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf der Heizseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, Bündig mit Rand der Kaltseite über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 80 W, 100 W, 120 W, 140 W, 150 W, 200 W

-Lage: horizontal

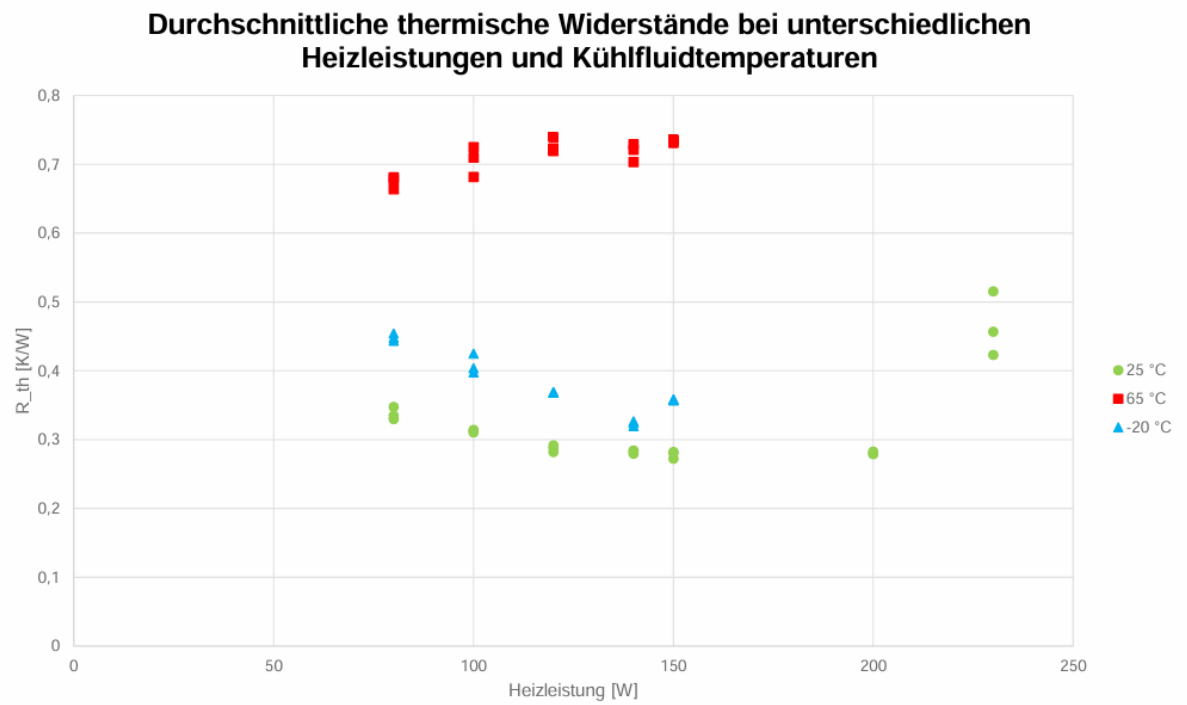

Abbildung 3: Vollständig an die Kühlung angebundene PHP

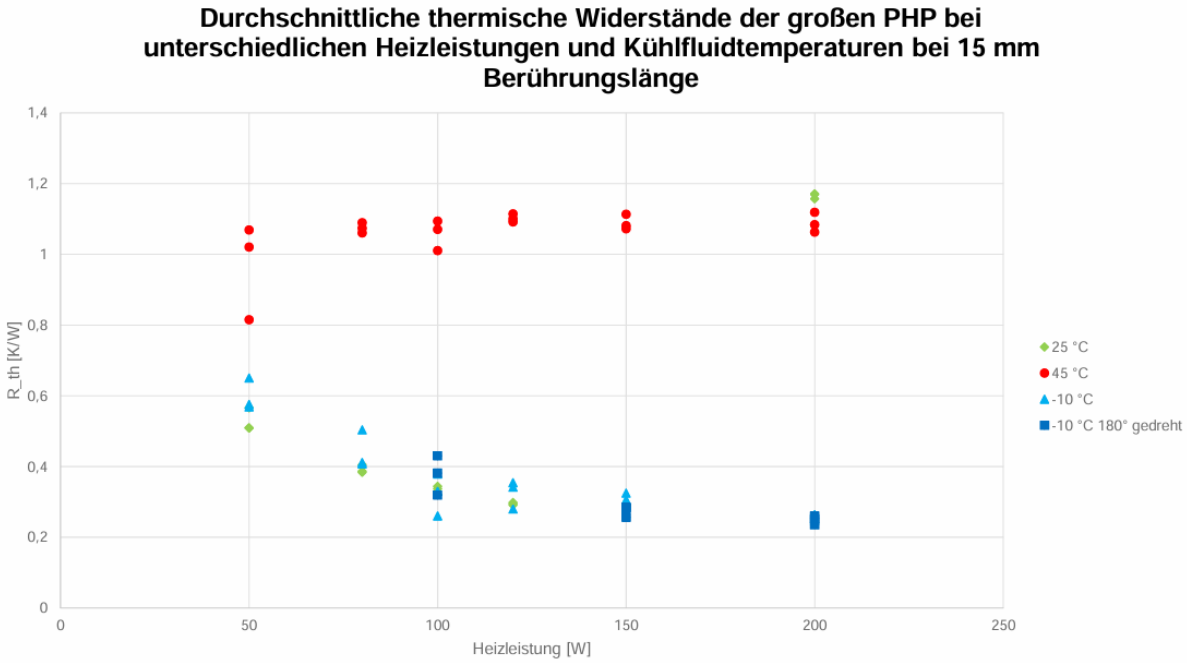

Abbildung 4: PHP bei verminderter Anbindung an die Kühlfläche

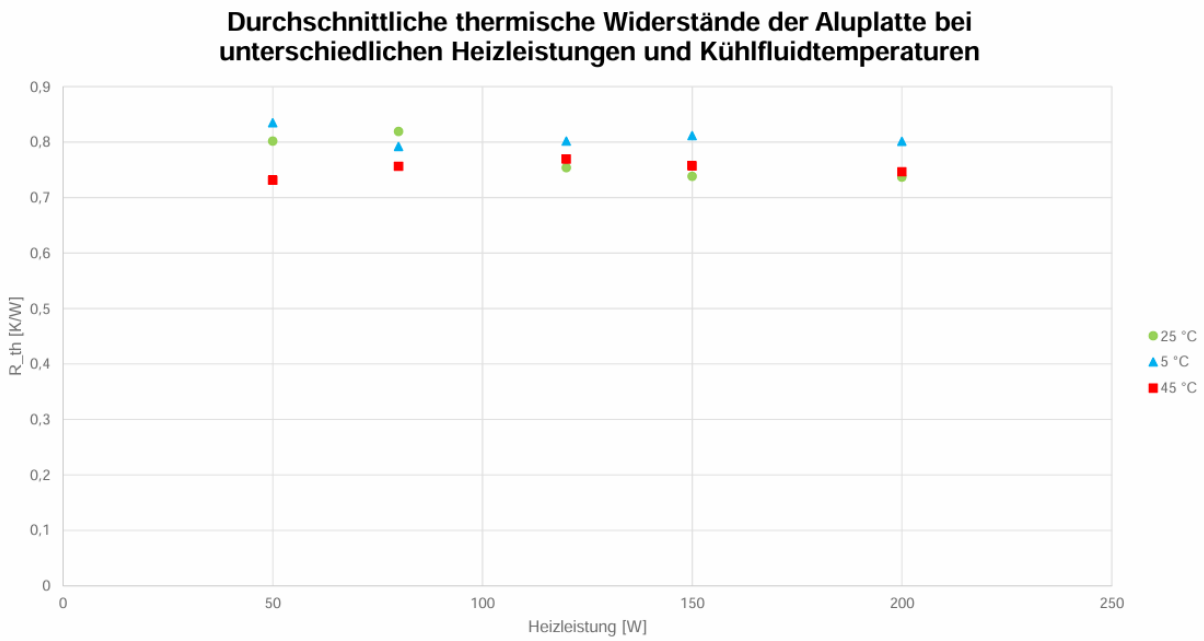

Abbildung 5: Vollständig an die Kühlung angebundene Aluminiumplatte

Abbildung 3-5 zeigt die durchschnittlichen thermischen Widerstände der einzelnen Messreihen auf. Anstiege der thermischen Widerstände der PHPs bei erhöhten Verlustleistungen lassen sich mit dem sogenannten Dryout erklären. Hierbei verliert die PHP ihre Funktionsfähigkeit, da die Oszillation bzw. das Pulsieren des Arbeitsmittels in der PHP durch zu hohe Temperaturen gestört wird. Der Temperaturanstieg ist eine Folge, dass die ansteigende Verlustleistung nicht vollständig abgeführt werden kann.

Einzelne Betriebsparameterkombinationen wurden im stationären Zustand durchgeführt. Die thermischen Widerstandsanteile der verwendeten Graphitfolien wurden für die Bestimmung der thermischen Widerstände der PHPs und der Aluminiumplatte herausgerechnet. Die thermischen Widerstände der Graphitfolien wurden mit einem vom ZFW eigens entwickelten TIM-Tester bestimmt.

Bei einer Kühlfluidtemperatur von 65 °C wechselte die PHP zu Beginn der Messung in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 25 °C, bzw. -20 °C befand sich die PHP über alle Leistungsniveaus bis 150 W im Normalbetrieb. Zur Bestimmung des Leistungsniveaus, bei dem die PHP in den Dryout wechselt, wurde die Verlustleistung, die über die PHP abgeführt wird, exemplarisch bei einer Kühlfluidtemperatur von 25 °C weiter erhöht. Die PHP wechselte bei einer Verlustleistung von 230 W in den Dryout.

In der Testreihe mit verminderter Überlappungsfläche zum Kühlblock wechselte die PHP bei 45 °C zu Beginn der Messung in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 25 °C wechselte die PHP bei 200 W in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von -10 °C befand sich die PHP über alle Leistungsniveaus im Normalbetrieb.

In der Testreihe mit der Verwendung einer Aluminiumplatte mit den gleichen geometrischen Abmessungen wurden über alle Kühlfluidtemperaturen und Leistungsniveaus konstante thermische Widerstände von ca. 0,8 K/W ermittelt. Im Vergleich mit der PHP unter denselben Randbedingungen wies diese einen um den Faktor 2,7 geringeren thermischen Widerstand auf (0,3 K/W). Die Maximaltemperaturen an der Heißseite der PHP betrugen bei 200 W angelegter

Verlustleistung mit 84 °C ca. 56% der Temperaturen der Aluminiumplatte an gleicher Stelle (150 °C).

Untersuchung eines kleineren PHP-Modells

Im Folgenden wurde ein kleineres PHP-Modell mit Auslegung für geringere Verlustleistungen auf seine Performance untersucht, wenn der Wärmetransport hauptsächlich durch die Ebene stattfindet und die PHP damit als Wärmespreizer fungiert. Diese Randbedingungen wurden für die Messreihen definiert:

Variation der Verlustleistung:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C, 45 °C, -10 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 25 mm x 25 mm, 37,5 mm Abstand zum Rand mit Kühlblock auf gleicher Achse, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, Bündig mit Rand der Kaltseite über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 20 W, 40 W, 60 W, 80 W

-Lage: horizontal

Variation der geometrischen Positionierung des Kühl- und Heizblocks:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C, 45 °C, -10 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 25 mm x 25 mm, 57,5 mm Abstand zum Rand mit Kühlblock auf gleicher Achse, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 20 mm Abstand zum Rand der Kaltseite über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 20 W, 40 W, 60 W, 80 W, 100 W, 120 W, 140 W, 160 W

-Lage: horizontal

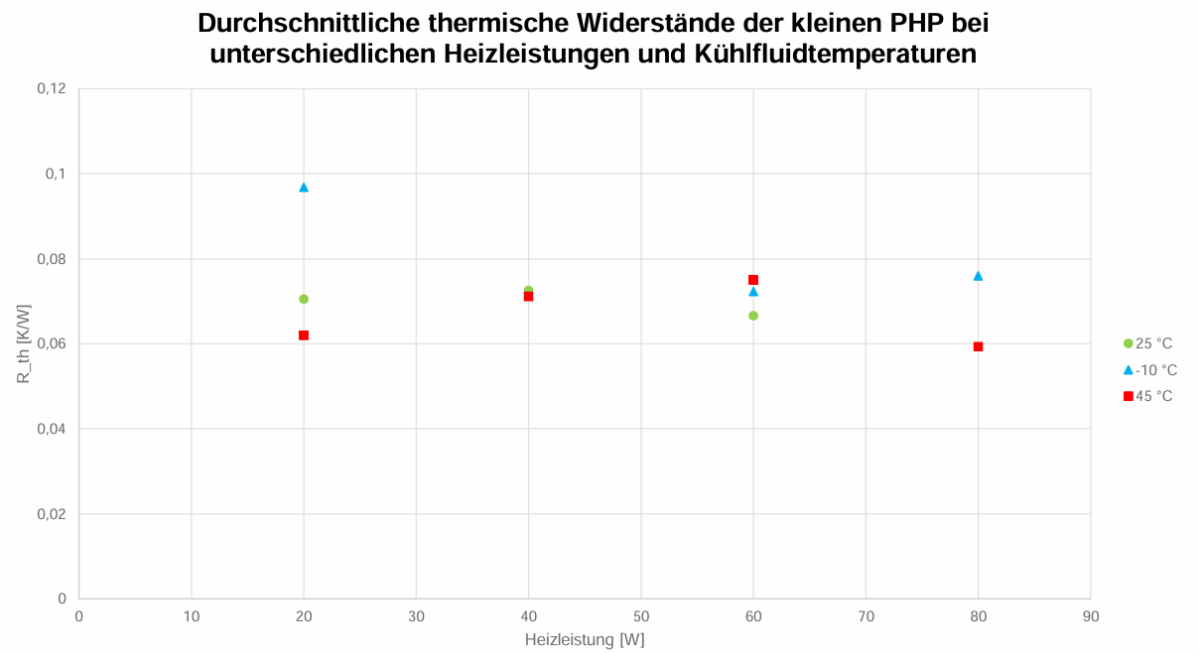

Abbildung 6: Vollständig an die Kühlung angebundene PHP (klein)

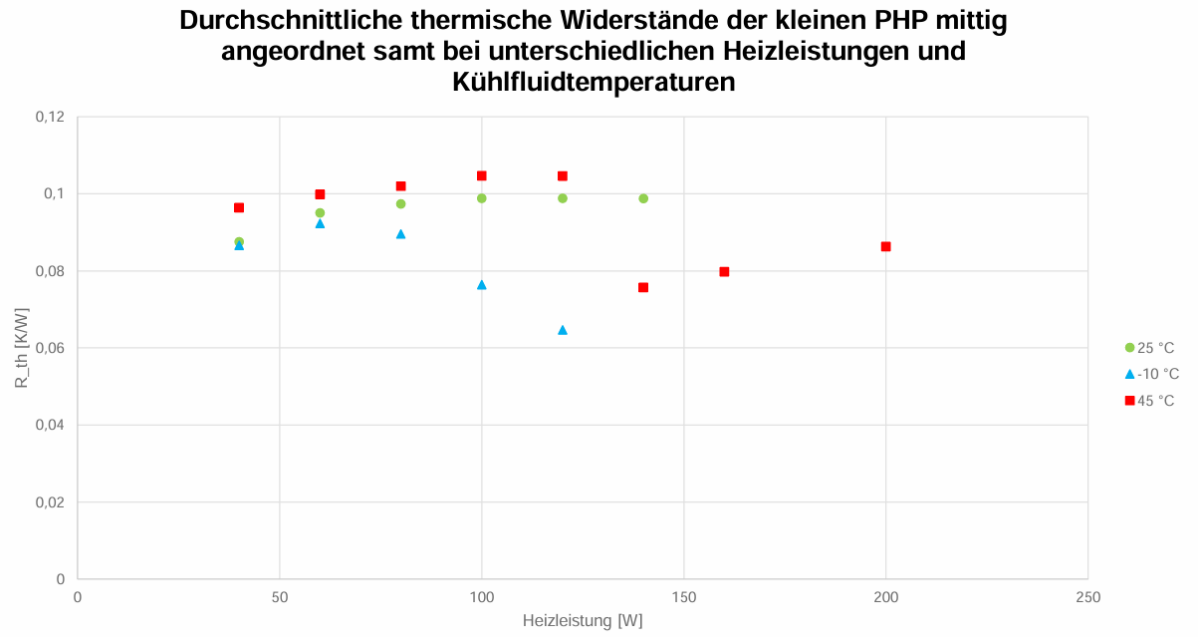

Abbildung 7: PHP (klein) als reiner Wärmespreizer

Abbildung 6-7 zeigt die durchschnittlichen thermischen Widerstände der einzelnen Messreihen auf.

In der Messreihe mit der kleinen PHP-Variante, in der Kühl- und Heizblock am Rand der PHP angebracht waren, befand sich die PHP über alle Leistungsniveaus und Kühlfluidtemperaturen im Normalbetrieb. Der durchschnittliche thermische Widerstand von ca. 0,07 K/W war um den Faktor 4,3 geringer als der thermische Widerstand bei den Messungen der großen PHP-Variante. Dies liegt an der geringeren Weglänge zwischen Wärmequelle und -senke, da diese nur durch die Plattenebene geht.

Bei mittiger Anordnung des Kühl- und Heizblocks waren die thermischen Widerstände im Durchschnitt ca. 30 % höher als bei der Anordnung am Rand. Die PHP befand sich über alle Leistungsniveaus und Kühlfluidtemperaturen im Normalbetrieb. Der Grund für das Ausbleiben des Dryouts liegt in der geometrischen Nähe von Wärmequelle und Senke.

Untersuchungen mit Thermokamera

Die Untersuchung des Temperaturfeldes der PHPs wurde mithilfe einer Thermokamera durchgeführt. Mit dieser Untersuchung können Aussagen über die Temperaturhomogenität getroffen werden. Jeweils ein Exemplar der großen sowie der kleinen PHP-Variante wurde mit einem schwarzen Ofenlack mit bekanntem Emissionsgrad besprüht. Dies ist notwendig, um einen hohen, bekannten Emissionsgrad zu erreichen. Es wurden jeweils 6 Temperaturpunkte an unterschiedlichen Stellen der Oberfläche der PHPs je Leistungsniveau aufgenommen. Folgende Randbedingungen wurden für die Untersuchung festgelegt.

Große PHP-Variante

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf der Heizseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, Bündig mit Rand der Kaltseite über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 80 W, 150 W

-Lage: horizontal

Kleine PHP-Variante

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 25 mm x 25 mm, 57,5 mm Abstand zum Rand mit Kühlblock auf gleicher Achse, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 20 mm Abstand zum Rand der Kaltseite über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 80 W, 150 W

-Lage: horizontal

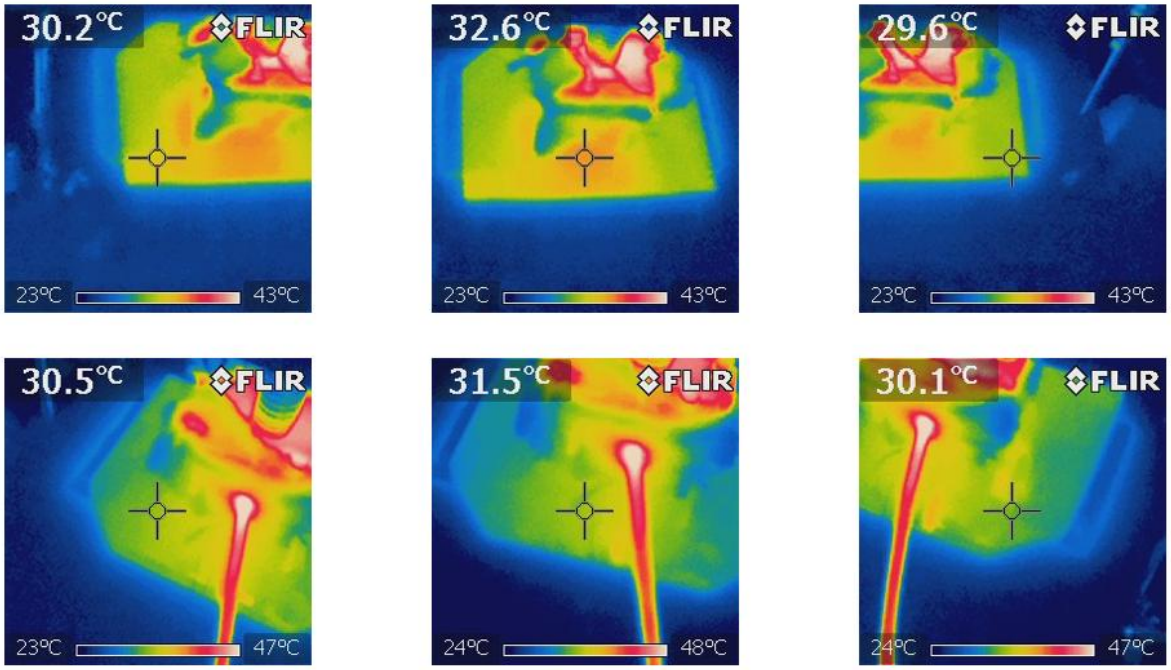

Abbildung 8: Aufnahmen der PHP (klein) mit Thermokamera bei 80 W Verlustleistung

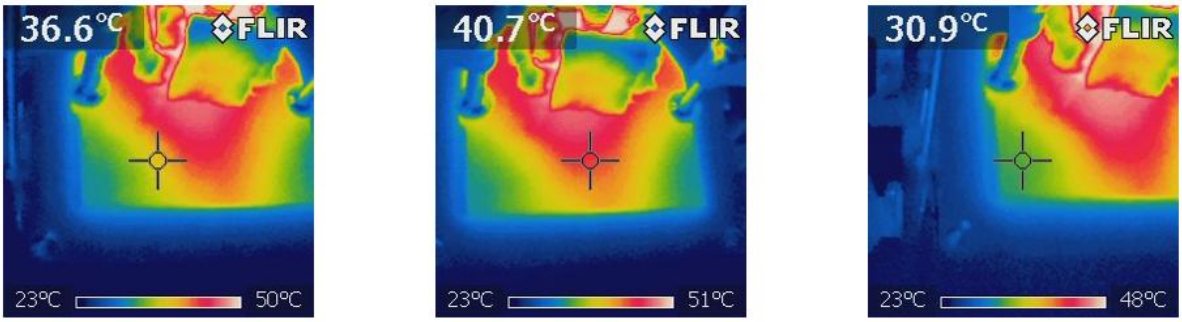

Abbildung 9: Aufnahmen der PHP mit Thermokamera bei 80 W Verlustleistung

	Durchschnittstemperatur [°C]	Standardabweichung [K]
Kleine PHP 40 W	28,27	0,476
Kleine PHP 80 W	30,75	1,104
Kleine PHP 120 W	33,08	1,507
Große PHP 80 W	36,07	4,922
Große PHP 150 W	39,93	6,349

Tabelle 1: Durchschnittliche Oberflächentemperaturen der PHPs bei gegebenen Verlustleistungen

Abbildung 8-9 zeigen exemplarisch Aufnahmen der PHP-Modelle mit einer Wärmebildkamera. Tabelle 1 zeigt die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen der PHPs während der Versuche auf.

Die Temperaturverteilung der großen PHP-Variante wies aus den Temperaturmessungen bei 80 W eine Standardabweichung von 4,9 K und bei 150 W eine Standardabweichung von 6,3 K auf. Die Standardabweichungen der kleinen PHP-Variante betrugen 0,5 K bei 40 W, 1,1 K bei 80 W und 1,5 K bei 120 W. Im direkten Vergleich bei 80 W angelegter Verlustleistung besitzt die kleine PHP-Variante eine um Faktor 4,5 geringere Standardabweichung im Temperaturfeld und besitzt damit eine höhere Homogenität. Die Durchschnittstemperatur ist auf der Oberfläche der kleinen PHP-Variante bei 80 W mit 30,75 °C um ca. 15 % geringer als auf der großen PHP-Variante mit 36,07 °C. Die geringere Durchschnittstemperatur und höhere Homogenität stellen sich aufgrund der geometrischen Positionierung von Wärmequelle und -senke ein. Im Aufbau der kleinen PHP-Variante wird die Wärme nur durch die PHP-Ebene geleitet. Im Aufbau der großen PHP-Variante wird die Wärme zusätzlich innerhalb der Ebene geleitet.

Validierung des Versuchsaufbaus

Die Performance der Aluminiumplatte wurde zusätzlich zu den Messungen mittels einer Simulation untersucht. Die Simulation hat das Ziel, die Messergebnisse des Versuchsaufbaus quantitativ zu validieren. Hierbei wurde eine adiabate Umgebung angenommen, ohne Wärmeverluste. Folgende Stoffeigenschaften der Aluminiumplatte wurden für die Simulation mithilfe von ZFW eigenen Gerätschaften ermittelt:

Temperaturleitfähigkeit: Laser-Flash-Analyse (LFA)

Spezifische Wärmekapazität: Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Dichte: Dichtemessung nach archimedischem Prinzip

Die Wärmeleitfähigkeit, die für die Simulation benötigt wird, berechnet sich aus dem Produkt der Temperaturleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität und der Dichte.

Lambda = a*roh*cp

Die Proben für die Stoffwertbestimmungen wurden aus derselben Platte gefräst, wie die Aluminiumplatte, um gleiche Stoffwerte zu garantieren. Die Simulation berrechnete thermische Widerstände von ca. 0,55 K/W. Im Vergleich zu den Messungen liegt hier ein Offset von 0,25 K/W vor. Die Grundlage für die Bestimmung des thermischen Widerstandes aus den Messungen war der gemessene abgeführte Wärmestrom, der ungefähr 80 % der eingespeisten Verlustleistung betrug. Ca. 20 % des Wärmestroms sind an die Umgebung verloren gegangen. Nimmt man zur Bestimmung des thermischen Widerstandes die eingespeiste Verlustleistung als Grundlage, gibt es Unterschiede im thermischen Widerstand von max. 0,05 K/W. Für die weiteren Berechnungen des thermischen Widerstandes wurde entschieden, dass der Mittelwert aus abgeführtem Wärmestrom und eingespeister Verlustleistung als Grundlage verwendet wird, um realitätsnahe thermische Widerstände abzubilden. Abbildung 10 zeigt das Simulationsmodell auf, dass für die Berechnungen verwendet wurde.

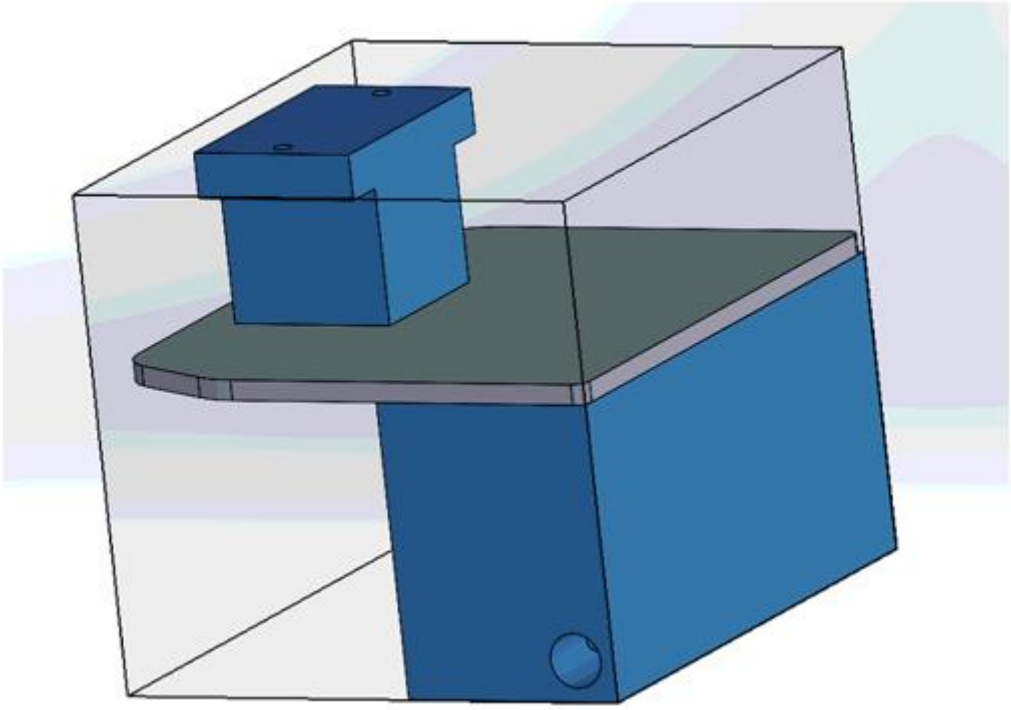

Abbildung 10: Simulationsmodell Wärmeabfuhr PHP

Variation der Füllmenge und Inklination zweier neuer PHP-Modelle

Weitere signifikante Stellgrößen in der Auslegung von PHPs sind die Füllmenge und die Inklination bzw. Ausrichtung. Diese wurden im Folgenden über zwei weitere von der Firma Bosch bereitgestellte PHP-Modelle untersucht. Folgende Randbedingungen wurden für die Messreihen festgelegt:

Variation der Verlustleistung:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 0 °C, 25 °C, 45 °C, 65 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 8 mm Abstand zum Rand auf der Heißseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, mittig jeweils 5 mm Abstand zu den Rändern der PHP, 15 mm der Breite des Kühlblocks bedecken die PHP auf der Kaltseite

-Füllgrad Arbeitsmedium der PHP: 50 %

-Verlustleistung: 40 W, 80 W, 120 W, 160 W, 200 W, 240 W (für 0 °C, 25 °C, 45 °C), 280 W (für 0 °C, 25 °C)

-Lage: horizontal 0 °

Variation der Inklination der PHP:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 0 °C, 25 °C, 45 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 8 mm Abstand zum Rand auf der Heißseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, mittig jeweils 5 mm Abstand zu den Rändern der PHP, 15 mm der Breite des Kühlblocks bedecken die PHP auf der Kaltseite

-Füllgrad Arbeitsmedium der PHP: 50 %

-Verlustleistung: 40 W, 80 W, 120 W, 160 W, 200 W, 240 W, 280 W, 320 W (für 0 °C)

-Lage: vertikal +90 ° (Wärmequelle befindet sich unter Wärmesenke)

Variation der Inklination der PHP:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 0 °C, 25 °C, 45 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 8 mm Abstand zum Rand auf der Heißseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, mittig jeweils 5 mm Abstand zu den Rändern der PHP, 15 mm der Breite des Kühlblocks bedecken die PHP auf der Kaltseite

-Füllgrad Arbeitsmedium der PHP: 50 %

-Verlustleistung: 40 W, 80 W, 120 W, 160 W, 200 W, 240 W, 280 W, (für 0 °C, 25 °C)

-Lage: vertikal -90 ° (Wärmequelle befindet sich über Wärmesenke)

Variation des Füllgrades der PHP (s.a. Projektdokumentation_Erdrich_Heatpipe ab Folie 39):

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C, 45 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 8 mm Abstand zum Rand auf der Heißseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, mittig jeweils 5 mm Abstand zu den Rändern der PHP, 15 mm der Breite des Kühlblocks bedecken die PHP auf der Kaltseite

-Füllgrad Arbeitsmedium der PHP: 66 %

-Verlustleistung: 40 W, 80 W, 120 W, 160 W

-Lage: horizontal 0 °

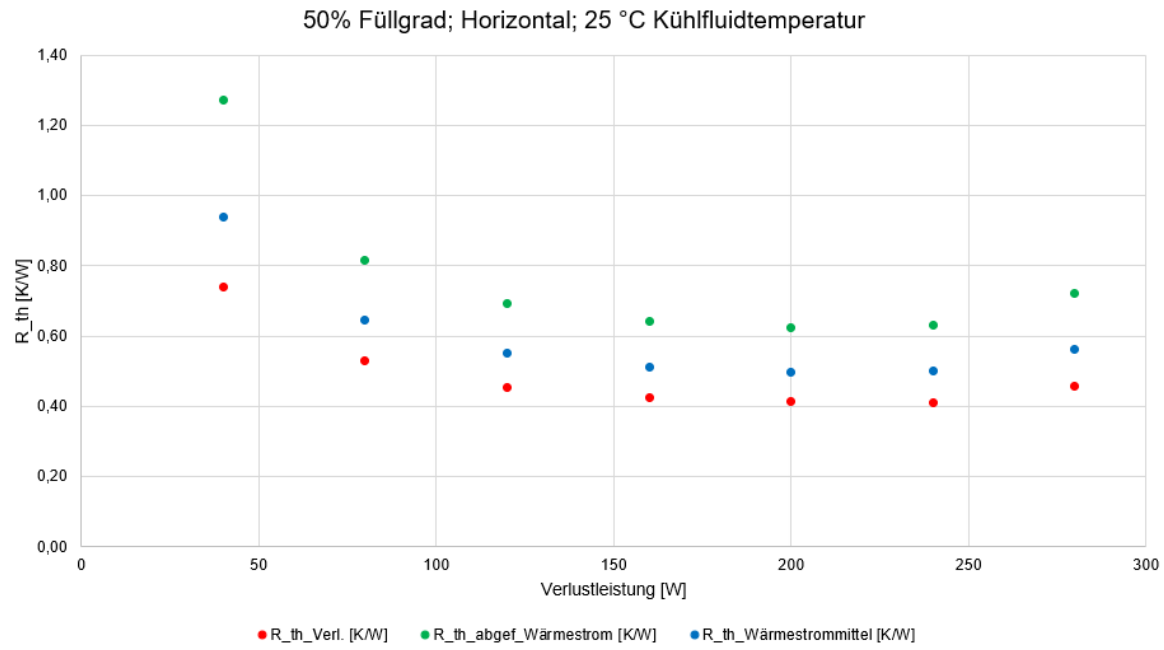

Abbildung 11: 50 % Füllgrad; Horizontal; 25 °C Kühlfluidtemperatur

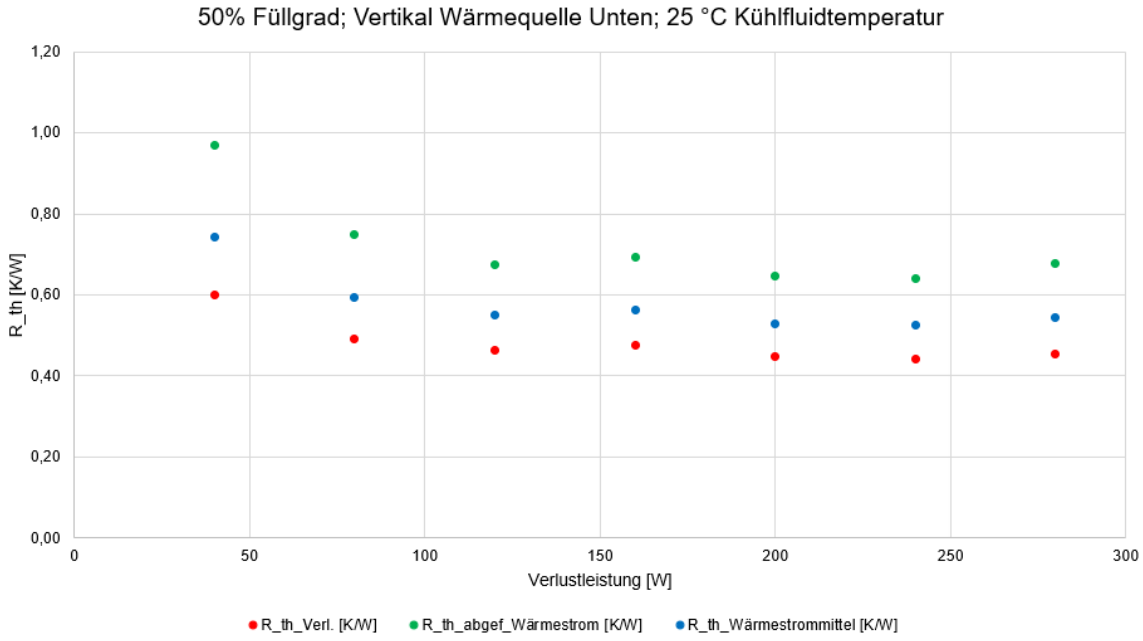

Abbildung 12: 50 % Füllgrad; Vertikal Wärmequelle unten; 25 °C Kühlfluidtemperatur

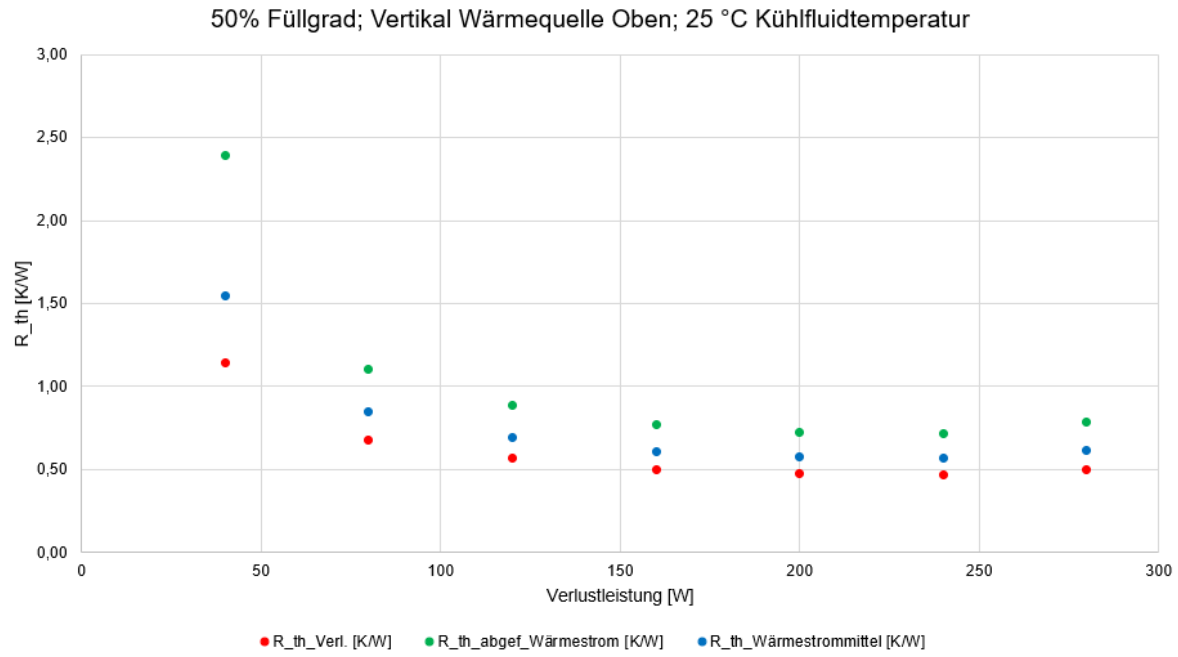

Abbildung 13: 50 % Füllgrad; Vertikal Wärmequelle oben; 25 °C Kühlfluidtemperatur

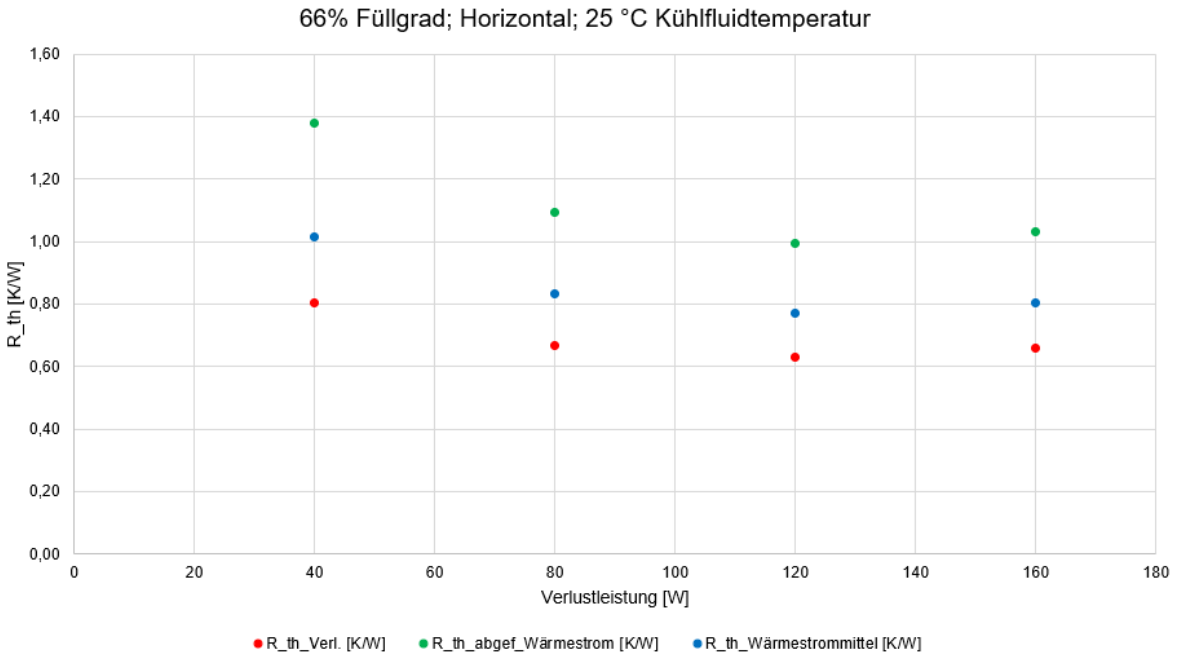

Abbildung 14: 66 % Füllgrad; Horizontal; 25 °C Kühlfluidtemperatur

Abbildung 11-14 zeigt exemplarisch den Verlauf des thermischen Widerstandes im Regelbetrieb der PHP bei fester Kühlfluidtemperatur und unterschiedlicher Ausrichtung bzw. unterschiedlichem Füllgrad.

Einzelne Betriebsparameterkombinationen wurden im stationären Zustand durchgeführt. Die thermischen Widerstandsanteile der verwendeten Graphitfolien wurden für die Bestimmung der thermischen Widerstände der PHPs herausgerechnet. Die thermischen Widerstände der Graphitfolien wurden mit einem vom ZFW eigens entwickelten TIM-Tester bestimmt.

In horizontaler Lage bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 50 % wechselte die PHP bei einer Kühlfluidtemperatur von 0 °C, bzw. 25 °C bei einer Verlustleistung von 320 W in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 45 °C wechselte die PHP bei einer Verlustleistung von 280 W in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 65 °C wechselte die PHP bei einer Verlustleistung von 240 W in den Dryout.

In vertikaler Lage +90 ° (mit der Wärmequelle unter der Wärmesenke) bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 50 % wechselte die PHP bei einer Kühlfluidtemperatur von 0 °C bei einer Verlustleistung von 360 W in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 25 °C wechselte die PHP bei einer Verlustleistung von 320 W in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 45 °C wechselte die PHP bei einer Verlustleistung von 320 W in den Dryout.

In vertikaler Lage -90 ° (mit der Wärmequelle über der Wärmesenke) bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 50 % wechselte die PHP bei einer Kühlfluidtemperatur von 0 °C bei einer Verlustleistung von 320 W in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 25 °C wechselte die PHP bei einer Verlustleistung von 320 W in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 45 °C wechselte die PHP bei einer Verlustleistung von 280 W in den Dryout.

In horizontaler Lage bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 66 % wechselte die PHP bei einer Kühlfluidtemperatur von 25 °C bei einer Verlustleistung von 200 W in den Dryout. Bei einer Kühlfluidtemperatur von 45 °C wechselte die PHP bei einer Verlustleistung von 200 W in den Dryout.

Bei vertikaler Lage +90 ° war der maximal abführbare Wärmestrom um bis zu 14 % höher als in horizontaler und vertikaler -90 ° Lage. Der maximal abführbare Wärmestrom bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 50 % war um bis zu 60 % höher als bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 66 %

Der thermische Widerstand betrug bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 66 % ca. 0,65 K/W. Der thermische Widerstand betrug bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 50 % ca. 0,45 K/W in allen Inklinationen. Ca. 30 % geringer als bei einem Füllgrad des Arbeitsmediums von 66 %.

Variation der Kanalgeometrie von drei weiteren PHP-Modellen

Die Kanalgeometrie einer PHP besitzt einen signifikanten Einfluss auf ihre Performance. Es wurden insgesamt 3 weitere PHP-Modelle mit unterschiedlichen Kanalgeometrien, die von der Firma Bosch bereitgestellt wurden, untersucht. Alle drei Varianten besaßen eine Kanalbreite von 1,5 mm und eine Kanalhöhe von 3 mm. V11 besaß eine meanderförmige Kanalgeometrie mit einem geraden Kanalverlauf. V03 und V09 besaßen zusätzlich über die Fläche, auf die der Heizer angelegt wird, einen Sinusförmigen Kanalverlauf. Der sinusförmige Kanalteil von V03 betrug eine Amplitude von 0,2 mm und eine Wellenlänge von 5 mm. Der sinusförmige Kanalteil von V09 betrug eine Amplitude von 0,4 mm und eine Wellenlänge von 5 mm. Folgende Randbedingungen wurden dabei für die Messreihen festgelegt:

Variation der Verlustleistung:

-Volumenstrom: 1 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 24 mm Abstand zum Rand auf Heißseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse, je 11,5 mm Abstand zu den Rändern

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf Kaltseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 10 W, 20 W, 30 W, 40 W, 50 W, 80 W, 140 W, 200 W, 250 W, 300 W

-Lage: horizontal

-Variante: 03 (Sinusförmiger Kanalverlauf im Bereich der Heizfläche mit A = 0,2 mm und Lambda = 5 mm)

Variation der Kühlfluidvorlauftemperatur:

-Volumenstrom: 1 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 65 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 24 mm Abstand zum Rand auf Heißseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse, je 11,5 mm Abstand zu den Rändern

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf Kaltseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 20 W, 50 W, 60 W, 70 W, 80 W

-Lage: horizontal

-Variante: 03 (Sinusförmiger Kanalverlauf im Bereich der Heizfläche mit A = 0,2 mm und Lambda = 5 mm)

Variation der Kanalgeometrie:

-Volumenstrom: 1 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 24 mm Abstand zum Rand auf Heißseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse, je 11,5 mm Abstand zu den Rändern

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf Kaltseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 10 W, 20 W, 30 W, 40 W, 50 W, 60 W, 80 W, 100 W, 120 W, 140 W, 200 W, 250 W, 300 W, 320 W, 330 W, 340 W, 360 W

-Lage: horizontal

-Variante: 09 (Sinusförmiger Kanalverlauf im Bereich der Heizfläche mit A = 0,4 mm und Lambda = 5 mm)

Variation der Kanalgeometrie:

-Volumenstrom: 1 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 25 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, 24 mm Abstand zum Rand auf Heißseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse, je 11,5 mm Abstand zu den Rändern

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf Kaltseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse über die gesamte Breite der PHP

-Verlustleistung: 10 W, 20 W, 30 W, 40 W, 50 W, 60 W, 80 W, 100 W, 120 W, 140 W, 200 W, 250 W, 300 W

-Lage: horizontal

-Variante: 11 Kein Sinusförmiger Kanalverlauf

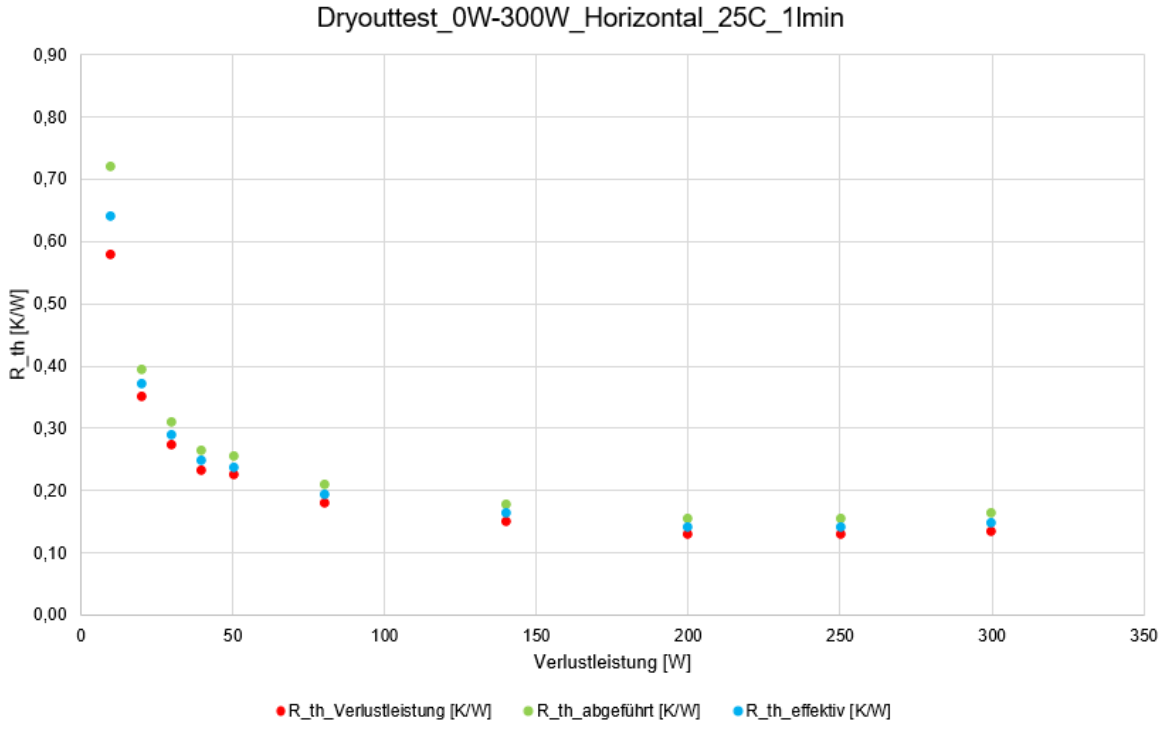

Abbildung 15: PHP-Modell V03

Eingeführte Verlustleistung [W]	Abgeführter Wärmestrom [W]	Relativ abgef. Wärmestrom [%]	Effektiver Wärmestrom [W]	Mittel_Temperaturdifferenz _HB_KB [K]	R_th_Verlustleistung [K/W]	R_th_abgeführt [K/W]	R_th_effektiv [K/W]
100	86,44	0,86	93,22	16,60	0,17	0,19	0,18
140	122,42	0,87	131,21	22,27	0,16	0,18	0,17
200	174,90	0,87	187,45	28,88	0,14	0,17	0,15
250	217,75	0,87	233,88	35,45	0,14	0,16	0,15
300	260,48	0,87	280,24	42,04	0,14	0,16	0,15
320	279,57	0,87	299,78	44,94	0,14	0,16	0,15
330	287,85	0,87	308,93	45,96	0,14	0,16	0,15
340	295,71	0,87	317,86	48,35	0,14	0,16	0,15
360	312,90	0,87	336,45	53,84	0,15	0,17	0,16

Tabelle 2: PHP-Modell V03

Eingeführte Verlustleistung [W]	T1 Mittel [°C]	T2 Mittel [°C]	T3 Mittel [°C]	T4 Mittel [°C]	T5 Mittel [°C]	T6 Mittel [°C]	T7 Mittel [°C]
100	50,81	53,10	52,63	52,52	36,58	35,35	35,07
140	60,52	63,71	63,03	62,91	41,46	39,97	39,39
200	72,78	77,32	76,26	76,29	48,14	46,76	45,46
250	83,91	89,62	88,29	88,40	53,63	52,23	50,45
300	95,08	101,91	100,27	100,50	59,21	57,52	55,47
320	100,06	107,35	105,55	105,84	61,70	59,87	57,72
330	101,83	109,33	107,47	107,81	62,60	60,78	58,57
340	105,15	112,96	111,02	111,38	63,93	61,77	59,63
360	112,51	120,61	118,55	118,95	66,15	63,61	61,69

Tabelle 3: PHP-Modell V03; Heißseite: T1-T4; Kaltseite: T5-T7

Die Abbildung 15 zeigt exemplarisch den thermischen Widerstand des PHP-Modells V03 über eine steigende Verlustleistung bei 25 °C Kühlfluidtemperatur an. Tabelle 2 zeigt exemplarisch die thermischen Widerstände von PHP-Modell V03 sowie die abgeführten Wärmeströme auf. Tabelle 3 zeigt exemplarisch die Mitteltemperaturen auf der Heiß- und Kaltseite von PHP-Modell V03 auf. Die Thermoelemente T1 bis T4 befanden sich auf der Heißseite. T5 bis T7 befanden sich auf der Kaltseite.

Variante 03 befand sich bei 25 °C Kühlfluidtemperatur ab 30 W Verlustleistung im Normalbetrieb und ging bei 320 W in den Dryout über. Variante 09 befand sich bei 25 °C Kühlfluidtemperatur ab 10 W Verlustleistung im Normalbetrieb und ging bei 370 W in den Dryout über. Variante 11 befand sich bei 25 °C Kühlfluidtemperatur ab 80 W Verlustleistung im Normalbetrieb und ging bei 320 W in den Dryout über. Variante 03 befand sich bei 65 °C Kühlfluidtemperatur ab 20 W Verlustleistung im Normalbetrieb und ging bei 100 W in den Dryout über.

Variante 09 konnte bei gleichen Randbedingungen einen um bis zu 20 % höheren Wärmestrom abführen und besaß eine um bis zu 15 % geringere Mitteltemperatur auf der Heißseite. Variante 09 befand sich bei 12,5 % der Verlustleistung im Normalbetrieb, bei der Variante 11 in den Normalbetrieb gewechselt ist. Bei 65 °C Kühlfluidtemperatur kann Variante 09 ca. 31 % des Wärmestroms abführen, den die PHP bei 25 °C Kühltemperatur abführen kann, bevor sie in den Dryout wechselt.

Ein richtig ausgelegter sinusförmiger Kanalverlauf erhöht damit den Verlustleistungsbereich einer PHP in welchem Sie im Normalbetrieb fungiert.

Vapour Chamber (VC):

Neben mehreren PHP-Modellen wurden VCs für den Einsatz als hochperformante Wärmespreizer und -leiter unter verschiedenen Randbedingungen untersucht. Unter anderem gab es eine Untersuchung des Leistungsverhaltens und der Temperaturverteilung von Vapor Chambers bei unterschiedlicher Inklination, bei Luft- und bei Wasserkühlung und mit, bzw. ohne Kühlrippenstruktur im luftgekühlten Aufbau. Die untersuchten VCs wurden von der Firma Bosch bereitgestellt. Die Messungen an den VCs fanden mithilfe desselben Prüfaufbaus statt, der für die Untersuchung der PHPs verwendet wurde.

Variation der Inklination zweier VC-Modelle mit Wasserkühlung

-Wasserkühlung ohne Rippenkühlkörper. Folgende Randbedingungen wurden zu Beginn festgelegt:

Variation der Verlustleistung:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 65 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, auf vorgesehenem Sockel d. VC. (s.a. Projektdokumentation_Vapor_Chamber ab Folie 8)

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf Kaltseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse über die gesamte Breite der VC

-Verlustleistung: 40 W, 80 W, 120 W, 160 W, 200 W, 240 W, 280 W, 320 W, 360 W, 400 W, 440 W

-Lage: horizontal

-Variante: 001 (High Performance Variante)

Variation der Inklination:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 65 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, auf vorgesehenem Sockel d. VC. (s.a. Projektdokumentation_Vapor_Chamber ab Folie 8)

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf Kaltseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse über die gesamte Breite der VC

-Verlustleistung: 40 W, 80 W, 120 W, 160 W, 200 W, 240 W, 280 W, 320 W, 360 W, 400 W, 440 W

-Lage: vertikal Wärmequelle unten, vertikal Wärmequelle oben (nur bis 320 W)

-Variante: 001 (High Performance Variante)

Variation des VC-Modells:

-Volumenstrom: 3 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 65 °C

-Position der Heiz- und Kühlblöcke:

Heizblock: 37 mm x 37 mm, auf vorgesehenem Sockel d. VC. (s.a. Projektdokumentation_Vapor_Chamber ab Folie 8)

Kühlblock: 130 mm x 50 mm, 10 mm Abstand zum Rand auf Kaltseite, mittig auf horizontaler Symmetrieachse über die gesamte Breite der VC

-Verlustleistung: 40 W, 80 W, 120 W, 160 W, 200 W, 240 W, 280 W, 320 W, 360 W, 400 W, 440 W

-Lage: horizontal vertikal Wärmequelle unten, vertikal Wärmequelle oben (nur bis 280 W)

-Variante: 019 (Standardvariante)

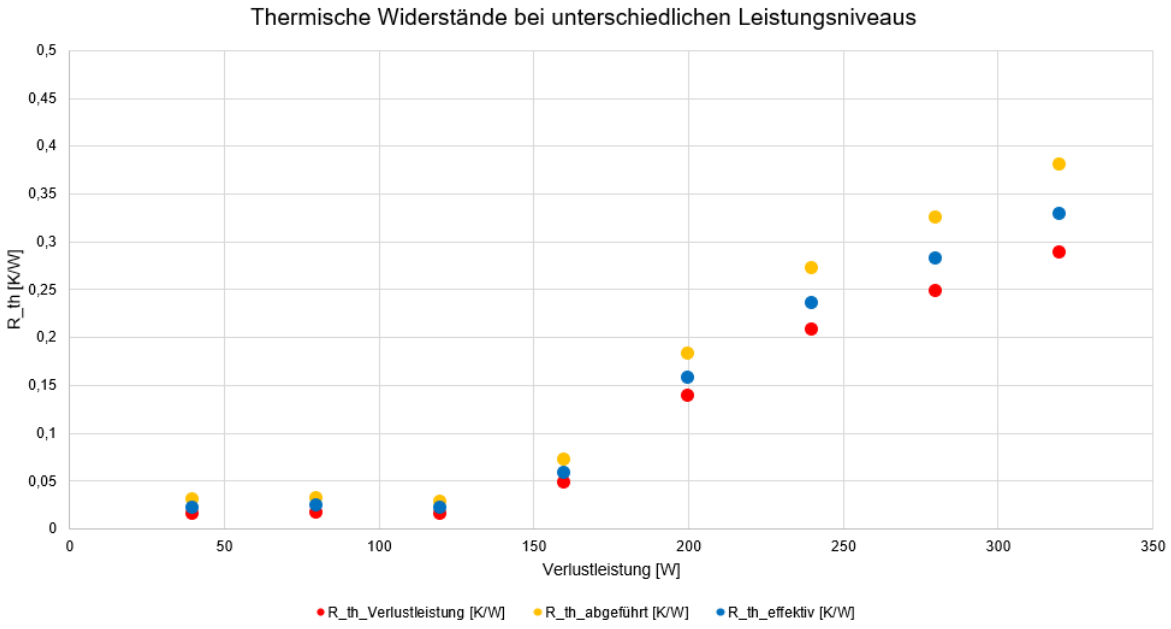

Abbildung 16: VC-Modell 001 in vertikaler Ausrichtung mit Wärmequelle oben

Abbildung 16 zeigt exemplarisch den Verlauf des thermischen Widerstandes des VC-Modells 001 in vertikaler Ausrichtung mit der Wärmequelle oberhalb der Wärmesenke.

Die Variante 001 (High Performance) wechselte in horizontaler Ausrichtung bei 320 W Verlustleistung in den Dryout. Der Wechsel in den Dryout erfolgte bei allen VCs graduell. Bei den PHPs erfolgte der Wechsel plötzlich. In vertikaler Ausrichtung mit der Wärmequelle unten wechselte die VC über die Versuchsdauer nicht in den Dryout. In vertikaler Ausrichtung mit der Wärmequelle oben wechselte die VC bei 160 W Verlustleistung in den Dryout.

Die Variante 019 (Standard) wechselte in horizontaler Ausrichtung bei 240 W Verlustleistung in den Dryout. In vertikaler Ausrichtung mit der Wärmequelle unten wechselte die VC bei 360 W in

den Dryout. In vertikaler Ausrichtung mit der Wärmequelle oben wechselte die VC bei 120 W Verlustleistung in den Dryout.

Die Variante 001 kann in vertikaler Lage mit der Wärmequelle unten einen um mindestens 37,5 % höheren Wärmestrom abführen als in horizontaler Lage, bzw. einen um mindestens 175 % höheren Wärmestrom abführen als in vertikaler Lage mit Wärmequelle oben. Die Variante 019 kann in vertikaler Lage mit der Wärmequelle unten einen um 50 % höheren Wärmestrom abführen als in horizontaler Lage, bzw. einen um 200 % höheren Wärmestrom abführen als in vertikaler Lage mit Wärmequelle oben. Die VCs sind im Übergang zum Dryout funktionsfähig mit höheren thermischen Widerständen.

Untersuchung der Temperaturhomogenität von luftgekühlten VCs ohne Rippenkühlung

-Luftkühlung mit zwei von Bosch bereitgestellten Lüftern ohne Rippenkühlkörper. VC eingebettet in Gehäuse. 3 Thermoelemente haben die Temperatur am Heizblock aufgenommen. 9 Thermoelemente in gleichmäßiger Verteilung haben die Temperaturen an der VC-Oberfläche aufgenommen. Folgende Randbedingungen wurden zu Beginn festgelegt:

Variation der Verlustleistung:

-Lüfterspannung: 12 V, 14 V

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 20 °C (Laborbedingungen)

-Position des Heizblocks: 37 mm x 37 mm, auf vorgesehenem Sockel d. VC. (s.a. Projektdokumentation_Vapor_Chamber ab Folie 33)

-Verlustleistung: 25 W, 50 W, 75 W, 100 W (nur bei 14 V Lüfterspannung)

-Lage: horizontal

-Variante: 018 (ungefüllt)

Variation des VC-Modells:

-Lüfterspannung: 12 V

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 20 °C (Laborbedingungen)

-Position des Heizblocks: 37 mm x 37 mm, auf vorgesehenem Sockel d. VC. (s.a. Projektdokumentation_Vapor_Chamber ab Folie 33)

-Verlustleistung: 25 W, 50 W, 75 W, 100 W, 125 W (nur Cu-Vollkühlkörper)

-Lage: horizontal

-Variante: 047 (Standard), Aluminium-Vollkühlkörper, Kupfer-Vollkühlkörper

Verlustleistung [W]	Std.abw. VC-Oberfläche [K]	Mitteltemp. VC-Oberfl. [°C]
25	**0,04121043**	**51,12139649**
50	**0,051375573**	**79,52723031**
75	**0,109853963**	**106,1670407**
100	**0,189045094**	**132,4570598**

Tabelle 4: Vapour Chamber Modell 047 ohne Rippenkühlung

Verlustleistung [W]	Std.abw. VC-Oberfläche [K]	Mitteltemp. VC-Oberfl. [°C]
0	**0,04**	**20,48**
25	**0,97**	**40,34**
50	**1,93**	**60,09**
75	**2,91**	**79,13**
100	**3,92**	**97,67**
125	**4,99**	**116,13**

Tabelle 5: Kupfer Vollkühlkörper ohne Rippenkühlung

Tabelle 4-5 zeigt exemplarisch die Mitteltemperaturen des VC-Modells 047 und eines Kupfer Vollkühlkörpers mit deren Standardabweichungen ohne zusätzliche Rippenkühlung. Diese sind ein Maß für die Temperaturhomogenität auf der Oberfläche der Kühlkörper.

Die mittlere Temperatur am Heizblock betrug bei der Variante 018 bei 12 V Lüfterspannung und 75 W Verlustleistung ca. 138 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 79 °C bei einer Standardabweichung von ca. 5,5 °C. Bei 14 Lüfterspannung und 75 W Verlustleistung betrug sie ca. 131 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 97 °C bei einer Standardabweichung von ca. 8,2 °C. Die mittlere Temperatur bei der Variante 047 bei 12 V Lüfterspannung und 75 W Verlustleistung ca. 115 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 106 °C bei einer Standardabweichung von ca. 0,1 °C. Die mittlere Temperatur am Heizblock betrug bei dem Aluminium-Vollkühlkörper bei 12 V Lüfterspannung und 75 W Verlustleistung ca. 116 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 79 °C bei einer Standardabweichung von ca. 8,0 °C. Die mittlere Temperatur am Heizblock betrug bei dem Kupfer-Vollkühlkörper bei 12 V Lüfterspannung und 75 W Verlustleistung ca. 97 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 79 °C bei einer Standardabweichung von ca. 2,9 °C. Die Standardabweichung der Oberflächentemperatur der Variante 047 beträgt maximal 2 % der Standardabweichung der Temperatur der Variante 018, bzw. maximal 3,5 % der des Kupfer-Vollkühlkörpers. Die gefüllte Variante besitzt eine signifikant höhere Homogenität in der Oberflächentemperaturverteilung.

Untersuchung der Temperaturhomogenität von luftgekühlten VCs mit Rippenkühlung

-Luftkühlung mit zwei von Robert Bosch bereitgestellten Lüftern mit Rippenkühlkörper. VC eingebettet in Gehäuse. 3 Thermoelemente haben die Temperatur am Heizblock aufgenommen. 9 Thermoelemente in gleichmäßiger Verteilung haben die Temperaturen an der VC-Oberfläche aufgenommen. Folgende Randbedingungen wurden zu Beginn festgelegt:

Variation der Verlustleistung:

-Lüfterspannung: 12 V

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 20 °C (Laborbedingungen)

-Position des Heizblocks: 37 mm x 37 mm, auf vorgesehenem Sockel d. VC. (s.a. Projektdokumentation_Vapor_Chamber ab Folie 33)

-Verlustleistung: 25 W, 50 W, 75 W, 100 W, 125 W, 150 W, 175 W

-Lage: horizontal

-Variante: 018 (ungefüllt)

Variation des VC-Modells:

-Lüfterspannung: 12 V

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 20 °C (Laborbedingungen)

-Position des Heizblocks: 37 mm x 37 mm, auf vorgesehenem Sockel d. VC. (s.a. Projektdokumentation_Vapor_Chamber ab Folie 33)

-Verlustleistung: 25 W, 50 W, 75 W, 100 W, 125 W, 150 W, 175 W, 200 W, 225 W (nur 047), 250 W (nur 047)

-Lage: horizontal

-Variante: 047 (Standard), Aluminium-Vollkühlkörper, Kupfer-Vollkühlkörper, Rippenkühlung ohne Wärmespreizer

Verlustleistung [W]	Std.abw. VC-Oberfläche [K]	Mitteltemp. VC-Oberfl. [°C]
0	**0,05**	**20,41**
25	**0,07**	**31,52**
50	**0,05**	**40,04**
75	**0,07**	**48,81**
100	**0,10**	**57,15**
125	**0,13**	**64,46**
150	**0,17**	**73,04**
175	**0,22**	**82,19**
200	**0,27**	**91,07**
225	**0,32**	**100,54**
250	**0,37**	**110,10**

Tabelle 6: Vapour Chamber Modell 047 mit Rippenkühlung

Verlustleistung [W]	Std.abw. VC-Oberfläche [K]	Mitteltemp. VC-Oberfl. [°C]
0	**0,04**	**20,72**
25	**1,08**	**31,22**
50	**2,12**	**41,33**
75	**3,12**	**51,58**
100	**4,09**	**61,88**
125	**5,08**	**72,08**
150	**6,02**	**82,09**
175	**7,00**	**91,25**
200	**7,95**	**100,30**

Tabelle 7: Kupfer Vollkühlkörper mit Rippenkühlung

Tabelle 6-7 zeigt exemplarisch die Mitteltemperaturen des VC-Modells 047 und eines Kupfer Vollkühlkörpers mit deren Standardabweichungen mit zusätzlicher Rippenkühlung. Diese sind ein Maß für die Temperaturhomogenität auf der Oberfläche der Kühlkörper.

Die mittlere Temperatur am Heizblock betrug bei der Variante 018 bei 12 V Lüfterspannung und 175 W Verlustleistung ca. 161 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 82 °C bei einer Standardabweichung von ca. 9,5 °C. Die mittlere Temperatur bei der Variante 047 bei 12 V Lüfterspannung und 175 W Verlustleistung ca. 99 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 82 °C bei einer Standardabweichung von ca. 0,2 °C. Die mittlere Temperatur am Heizblock betrug bei dem Aluminium-Vollkühlkörper bei 12 V Lüfterspannung und 175 W Verlustleistung ca. 141 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 78 °C bei einer Standardabweichung

von ca. 8,5 °C. Die mittlere Temperatur am Heizblock betrug bei dem Kupfer-Vollkühlkörper bei 12 V Lüfterspannung und 75 W Verlustleistung ca. 134 °C. Die mittlere Oberflächentemperatur betrug ca. 91 °C bei einer Standardabweichung von ca. 7,0 °C. Die Standardabweichung der Oberflächentemperatur der Variante 047 beträgt maximal 2,1 % der Standardabweichung der Temperatur der Variante 018, bzw. maximal 2,9 % der des Kupfer-Vollkühlkörpers. Die gefüllte Variante besitzt eine signifikant höhere Homogenität in der Oberflächentemperaturverteilung. Bei gleichen Temperaturen am Heizblock kann Variante 047 mit zusätzlichem Rippenkühlkörper einen mehr als 150 % höheren Wärmestrom abführen als ohne.

Aus thermischer Sicht sind Vapour Chambers besser als PHPs geeignet, um hohe punktuelle Verlustleistungen flächig zu spreizen. VCs können bei ähnlichen Dimensionen höhere Wärmeströme abführen, ohne aus dem Regelbetrieb zu fallen. Der Übergang in den Dryout und aus dem Regelbetrieb erfolgt graduell. Damit ist auch bei hohen Wärmelasten eine bedingte Funktionsfähigkeit der VCs vorhanden. Dies ist bei PHPs nicht der Fall, da diese mit dem Übergang in den Dryout ihre Wärmeleiteigenschaften komplett verlieren. Dies geht daraus hervor, dass in VCs trotz entstehendem Dryout eine Zirkulation des Arbeitsmediums vorherrscht bei geringerer Fläche, während die Zirkulation/ das Pulsieren bei PHPs beim Übergang in den Dryout komplett gestört wird.

Weitere innovative Kühlmethoden:

Folienkühlkörper:

Für die Untersuchung neuartiger Kühlmethoden wurde von der Firma Bosch ein Aufbau mit Folienkühlkörpern mit Heizelementen als Verlustleistungsquellen bereitgestellt. Die Folienkühlkörper wölben sich durch das Hindurchströmen von Kühlfluid auf und werden gegen eine Wand gepresst, die von mehreren Heizelementen beheizt wird. Die Vermeidung von TIMs ist hierbei das Ziel. Im gesamten Aufbau befinden sich vier parallel geschaltete Folienkühlkörper übereinander. Es wurde sowohl ein einzelner Kühlkörper als auch das Verhalten bei Inbetriebnahme aller untersucht. Zwischen zwei Folienkühlkörpern befand sich jeweils ein Gehäuse mit je 10 Heizelementen. An diesen waren Thermoelemente befestigt. Zusätzlich wurden Thermoelemente an die Oberfläche eines Folienkühlkörpers angebracht.

Ergebnisse bezüglich des Druckverlustes bei unterschiedlichen Randbedingungen.

Die Messung des Druckverlustes wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Variation des Volumenstroms:
  -Gesamtvolumenstrom: 4 l/min, 8 l/min, 10 l/min (Teilvolumenströme je ¼ des Gesamtvolumenstroms)
  -Kühlfluidvorlauftemperatur: 50 °C
  -Gesamtverlustleistung: 1,2 kW

- Variation der Kühlfluidvorlauftemperatur:
  -Gesamtvolumenstrom: 8 l/min (Teilvolumenströme je ¼ des Gesamtvolumenstroms)
  -Kühlfluidvorlauftemperatur: 35 °C, 50 °C, 65 °C
  -Gesamtverlustleistung: 1,2 kW

- Variation des Volumenstroms bei einem einzelnen Kühlkörper:
  -Gesamtvolumenstrom: 2 l/min, 2,5 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 50 °C
-Gesamtverlustleistung: 300 W

Der Druckverlust wurde mithilfe von strömungsgleichrichter Messrohren ermittelt. Der Druckverlust stieg mit der Erhöhung des Fluidvolumenstroms und mit Verringerung der Temperatur an, da das Kühlfluid (standardmäßig Wasser/Glykol) bei niedrigeren Temperaturen an Viskosität verliert. Der Druckverlust eines einzelnen Kühlkörpers war bei gleichem Teilvolumenstrom und gleichen Randbedingungen geringer als bei der Untersuchung des Gesamtaufbaus. Zusätzliche Turbulenzen im Verteiler und eine ungleichmäßige Verteilung des Gesamtvolumenstroms können die Ursache sein. Der Druckverlust war während der Messungen immer unter 300 mbar.

Charakterisierung des Kühlkörpers in Hinsicht auf dessen Oberflächentemperatur und lokalen Wärmeübergangskoeffizienten bei unterschiedlichen Randbedingungen.

Die Messung der Oberflächentemperatur wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Variation des Volumenstroms:
  -Gesamtvolumenstrom: 4 l/min, 8 l/min, 10 l/min (Teilvolumenströme je ¼ des Gesamtvolumenstroms)
  -Kühlfluidvorlauftemperatur: 50 °C
  -Gesamtverlustleistung: 1,2 kW

- Variation der Kühlfluidvorlauftemperatur:
  -Gesamtvolumenstrom: 8 l/min (Teilvolumenströme je ¼ des Gesamtvolumenstroms)
  -Kühlfluidvorlauftemperatur: 35 °C, 50 °C, 65 °C
  -Gesamtverlustleistung: 1,2 kW

- Variation des Volumenstroms bei einem einzelnen Kühlkörper:
  -Gesamtvolumenstrom: 2 l/min, 2,5 l/min
  -Kühlfluidvorlauftemperatur: 50 °C
  -Gesamtverlustleistung: 300 W
  -Wandstärke: 3 mm, 5 mm

- Variation der Temperatur bei einem einzelnen Kühlkörper:
  -Gesamtvolumenstrom: 3 l/min
  -Kühlfluidvorlauftemperatur: ~-16 °C (bei 2,5 l/min), 0 °C, 80 °C
  -Gesamtverlustleistung: 300 W
  -Wandstärke: 3 mm, 5 mm

Die größere Wandstärke bewirkte ein homogeneres Temperaturfeld. Die Standardabweichung der Durchschnittstemperaturen war um bis zu 0,6 °C geringer. Die Bauteile heizen sich im Gesamtbetrieb durch Kopplungen weiter auf.

In einer zweiten Versuchsreihe mit einem einzelnen Folienkühlkörper wurden zusätzlich Thermoelemente an die Oberfläche des Kühlkörpers geklebt. Die Ergebnisse aus diesen Messungen ergaben genauere Werte für die gemittelten Wärmeübergangskoeffizienten. Während der Inbetriebnahme unter Kühlfluidvorlauftemperaturen von -16 °C und 80 °C konnte der Folienkühlkörper diesen standhalten.

In einem weiteren Versuch wurde das Verhalten eines Kühlkörpers beim Ausfall seines Nachbarn simuliert. Hierbei konnte der Kühlkörper den Ausfall nicht ohne eine signifikante Temperaturerhöhung ausgleichen. Diese hätte zu einem Bauteilversagen führen können. Um den Aufbau vor Beschädigungen zu schützen, wurde der Versuch bei 115 °C an den Heizelementen unterbrochen.

Visuelle Betrachtung des Folienkühlkörpers in Hinsicht auf Rückverformbarkeit nach Verformung durch z.B. Partikeleinschlüsse:

Abbildung 17: Visuelle Betrachtung eines Folienkühlkörpers mit Einbuchtungen von Thermoelementen

In einem weiteren Versuch wurde der Folienkühlkörper zwischen zwei verspannte Plexiglasplatten mit definierten Abständen geschoben und unter verschiedenen Volumenströmen in Betrieb genommen, um das Ausdehnungsverhalten des Kühlkörpers zu untersuchen. Es gab keine visuellen Unterschiede des Anpressverhaltens bei unterschiedlichen Volumenströmen. Vor allem in den inneren Windungsbereichen des meanderförmigen Verlaufs traten Stellen auf, die keinen Kontakt zur Plexiglasoberfläche hatten, bzw. viele Lufteinschlüsse besaßen. Die größten Fehlstellen machen jene aus, an welche zuvor die zusätzlichen Thermoelemente samt deren Verkabelung angebracht waren. Zudem gab es einige punktförmige Lufteinschlüsse, bzw. Fehlstellen, die aufgrund von Partikeleinschlüssen entstanden. Diese Lufteinschlüsse entstanden durch die fehlende Rückverformbarkeit des Kühlkörpers und führen zu einer Verschlechterung der Wärmeübertragungseigenschaften. Abbildung 17 zeigt den Folienkühlkörper während der visuellen Beobachtung auf.

Druckgussluftkühlkörper:

Innerhalb des CeCaS-Projektes wurden Rippenkühlkörper untersucht, in die Kupfer, bzw. Aluminiumanteile als Einlage in ein vorgegebenes Gehäuse gegossen wurden. Ziel war es, anhand von Temperaturmessungen zu erkennen, ob der Guss gut an das Gehäuse angebunden war. Hierzu wurden jeweils zwei baugleiche Luftkühlkörper achsensymmetrisch an einen Heizblock thermisch und mechanisch befestigt. Der symmetrische Aufbau diente der Minimierung von Umgebungsverlusten. Der Heizblock wurde leistungsgeregelt über ein Netzteil betrieben. Die Kühlkörper wurden über Walzenlüfter gekühlt, die ebenfalls über ein Netzteil betrieben wurden. Folgende Parameter wurden zu Beginn der Messung festgelegt:

-Verlustleistung: 100 W (50 W je Seite)

-Betriebsspannung der Walzenlüfter: 14 V

Über verschiedene Thermoelemente wurden die Temperaturen an folgenden Stellen im stationären Zustand gemessen:

-2-mal im Heizblock

-je 1-mal in der Mitte der Kühlkörper

-je 1-mal am Rand der Kühlkörper

-je 1-mal zwischen Mitte und Rand der Kühlkörper

-je 1-mal auf einer mittigen Rippe der Kühlkörper

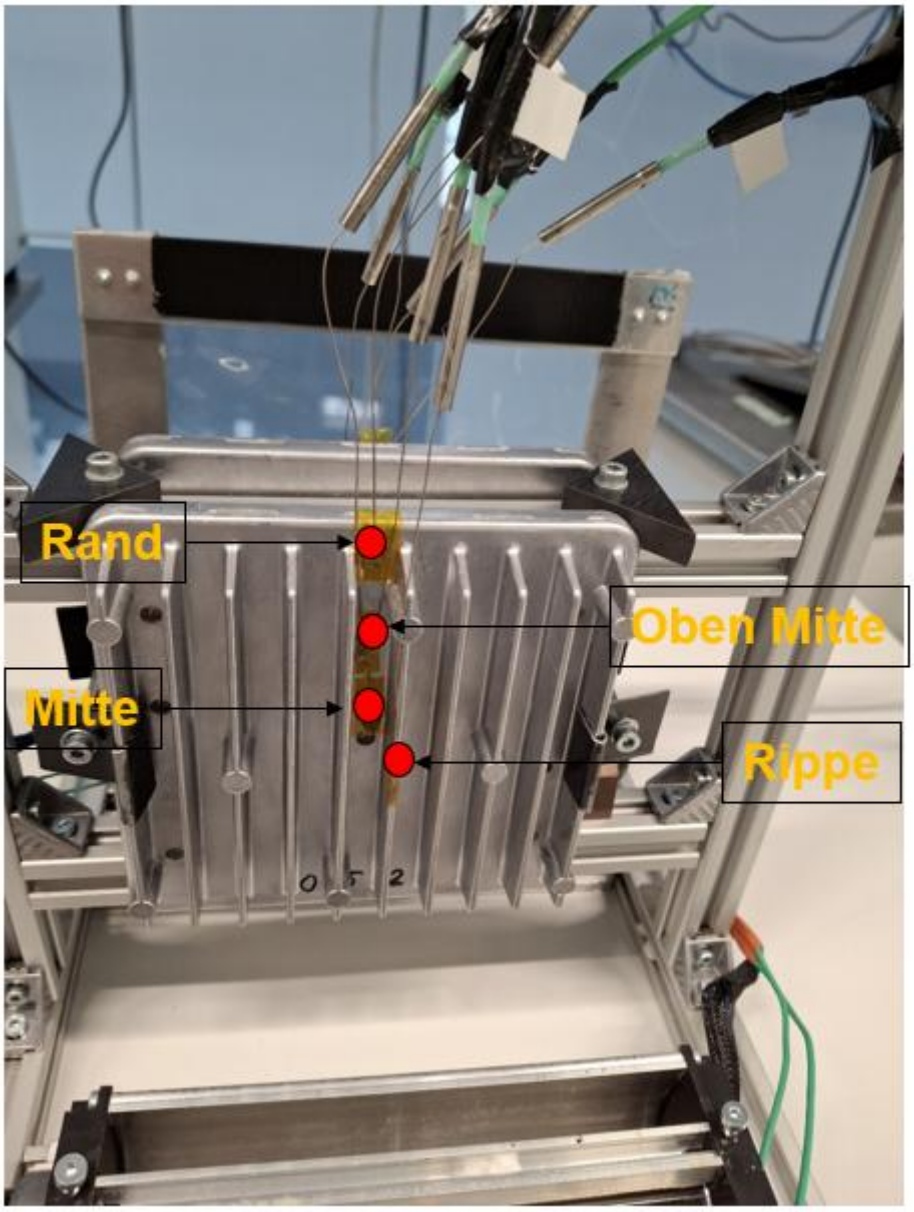

Abbildung 18: Aufbau und Positionierung der Thermoelemente für Druckgußluftkühlkörper

Die Rippenkühlkörper mit Aluminiumeinlegern haben mit ca. 85 °C direkt am Heizblock 7 % geringere Temperaturen im Vergleich zu den aufgedickten Kühlkörpern ohne Einleger aufgewiesen. Die Rippenkühlkörper mit Kupfereinlegern haben mit ca. 81 °C direkt am Heizblock 12 % geringere Temperaturen im Vergleich zu den aufgedickten Kühlkörpern ohne Einleger aufgewiesen.

Messungen am AP2-Gesamtdemonstrator:

Der Gesamtdemonstrator des Arbeitspakets 2 im CeCaS-Projekt wurde hinsichtlich des thermischen Widerstands von der Cartridge zum Kühlfluid bei der Verwendung unterschiedlicher Gap Pads als TIM untersucht. Zusätzlich wurde der Druckverlust des Gesamtdemonstrators gemessen, um einen Abgleich mit den Simulationsergebnissen der Firma Bosch zu schaffen. Abbildung 19 zeigt den Versuchsaufbau der Messungen zu den thermischen Widerständen von den Cartridges zum Kühlfluid am AP2-Gesamtdemonstrator. Folgende Randbedingungen wurden festgelegt:

Variation des Kühlfluidvolumenstroms:

-Volumenstrom: 3 l/min, 5 l/min, 7 l/min, 10 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 60 °C

-Position des Heizblocks: 2 mal 25 mm x 25 mm, auf vorgesehenem Sockel d. Cartridges

-Verlustleistung: 2 mal 60 W, 2 mal 80 W

-Cartridge 1 mit Gap Pad ohne Aluminiumfolie

-Cartridge 2 mit Gap Pad mit Aluminiumfolie

Variation der Gap Pads:

-Volumenstrom: 3 l/min, 5 l/min, 7 l/min, 10 l/min

-Kühlfluidvorlauftemperatur: 60 °C

-Position des Heizblocks: 2 mal 25 mm x 25 mm, auf vorgesehenem Sockel d. Cartridges

-Verlustleistung: 2 mal 60 W, 2 mal 80 W

-Cartridge 1

-Cartridge 2

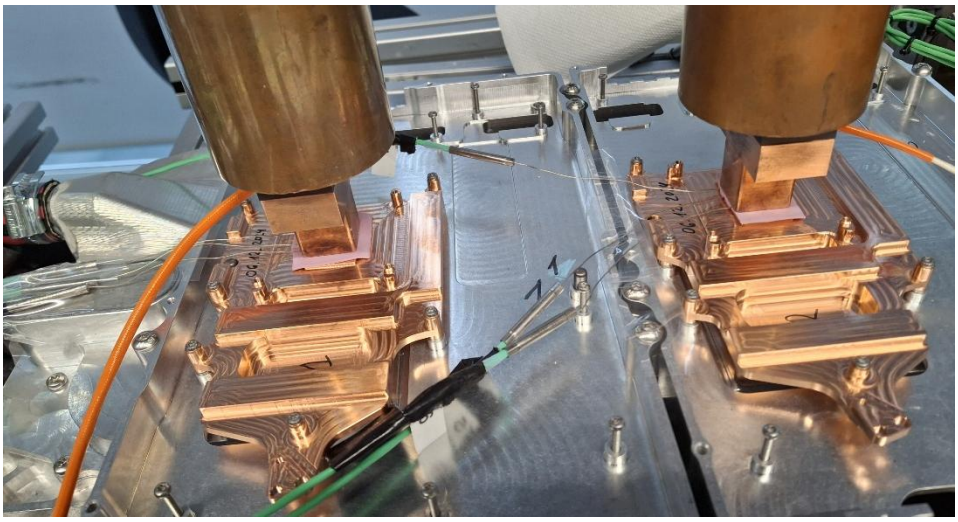

Abbildung 19: Aufbau Untersuchung der Cartridges am Gesamtdemonstrator

Test number	Start date	Finish date	Quantity of waterglycol [Liter/min.]	Temperature of waterglycol at inlet [°C]	Temperature of waterglycol at outlet [°C]	Heating power [W]	Temperature of heat spreader close to heating Cartridge 1 [°C]	Temperature of heat spreader close to heating Cartridge 2 [°C]	Rth Cartridge 1 [°C/W]	Rth Cartridge 2 [°C/W]
1	25.03.25	25.03.25	3	59,90	60,45	2 x 60	71,71	73,31	0,2072	0,2361
2	25.03.25	25.03.25	5	60,26	60,60	2 x 60	71,45	73,07	0,1990	0,2282
3	25.03.25	25.03.25	7	59,89	60,14	2 x 60	70,68	72,24	0,1883	0,2158
4	25.03.25	25.03.25	10	60,09	60,28	2 x 60	70,48	72,60	0,1790	0,2161
5	21.03.25	21.03.25	3	59,95	60,64	2 x 80	76,54	79,39	0,2194	0,2579
6	25.03.25	25.03.25	5	60,25	60,71	2 x 80	75,75	78,58	0,2030	0,2406
7	25.03.25	25.03.25	7	59,89	60,23	2 x 80	74,90	77,74	0,1974	0,2351
8	25.03.25	25.03.25	10	60,08	60,32	2 x 80	74,54	77,37	0,1920	0,2299

Tabelle 8: Auswertung der Temperaturen an Cartridge 1 mit GapPad mit Aluminiumfolie und Catridge 2 mit GapPad ohne Aluminiumfolie

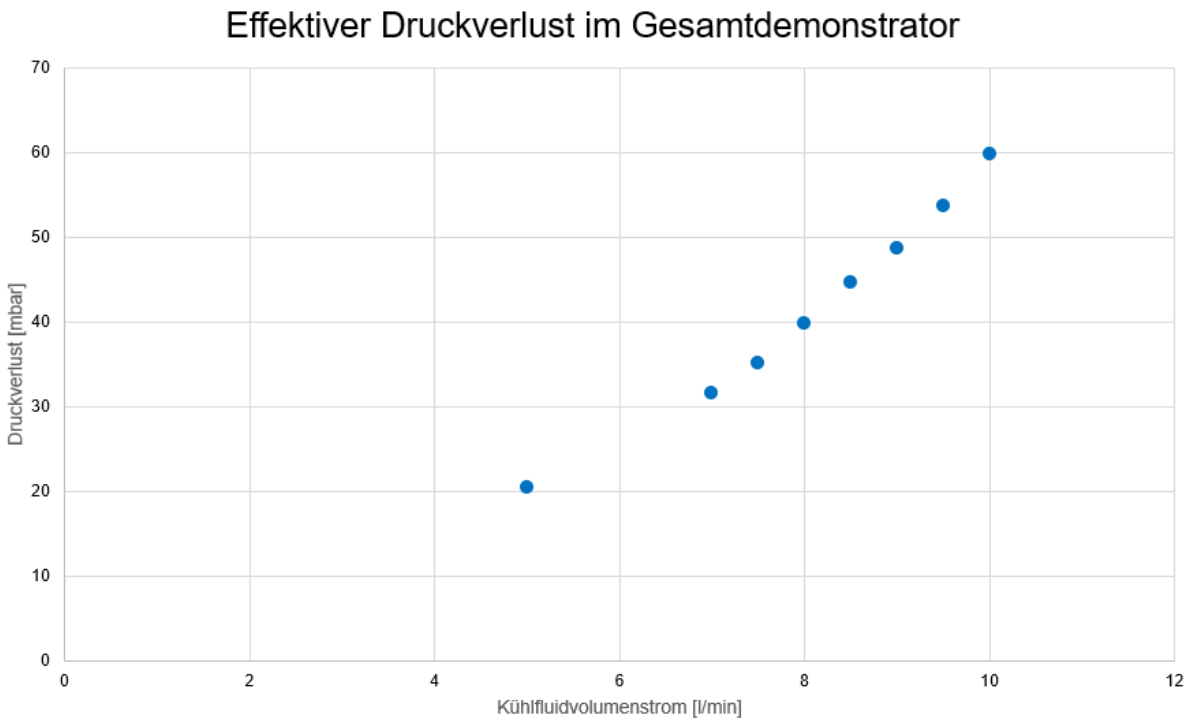

Abbildung 20: Gemessener Druckverlust im Gesamtdemonstrator

Tabelle 8 zeigt die Auswertung der Temperaturen an Cartridge 1 mit GapPad mit Aluminiumfolie und Catridge 2 mit GapPad ohne Aluminiumfolie. Abbildung 20 zeigt den Druckverlust im AP2-Gesamtdemonstrator über unterschiedliche Volumenströme

Cartridge 2 hatte einen um ca. 15 % geringeren thermischen Widerstand als Cartridge 1.

Die Druckverlustmessungen ergaben eine gute Übereinstimmung mit der Simulation der Firma Robert Bosch.