

Bewilligungsempfänger:  
Grunewald GmbH&Co.KG

**Machbarkeitsstudie zur Optimierung der Kühlung von Formwerkzeugen durch bionische Methoden zur Erhöhung der Taktzahl bei der Ausformung von Produkten und damit einer Effizienzsteigerung zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung.**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 30156/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von  
Prof. Dr. Heike Beismann  
Prof. Dr.-Ing. Udo Ossendoth  
Dr.-Ing. Michael Hermann  
Ulrich Grunewald

Bocholt, 14. September 2015

Bewilligungsempfänger:  
Grunewald GmbH&Co.KG

**Machbarkeitsstudie zur Optimierung der Kühlung von Formwerkzeugen durch bionische Methoden zur Erhöhung der Taktzahl bei der Ausformung von Produkten und damit einer Effizienzsteigerung zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung.**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 30156/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von  
Prof. Dr. Heike Beismann  
Prof. Dr.-Ing. Udo Ossendoth  
Dr.-Ing. Michael Hermann  
Ulrich Grunewald

Bocholt, 14. September 2015

| 10/01                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Projektkennblatt<br><br><div style="text-align: center;">           der<br/> <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b> </div> |                                                                                                                                                                                                                                               |  |                                    |                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| Az                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <b>30156</b>                                                                                                               | Referat                                                                                                                                                                                                                                       | <b>23</b>                                                                           | Fördersumme                        | <b>37.832 €</b> |
| <b>Antragstitel</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                            | <b>Machbarkeitsstudie zur Optimierung der Kühlung von Formwerkzeugen durch bionische Methoden zur Erhöhung der Taktzahl bei der Ausformung von Produkten und damit einer Effizienzsteigerung zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung</b> |                                                                                     |                                    |                 |
| <b>Stichworte</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                            | Kühlung, Bionische Methoden                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                     |                                    |                 |
| Laufzeit                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Projektbeginn                                                                                                              | Projektende                                                                                                                                                                                                                                   | Projektphase(n)                                                                     |                                    |                 |
| <b>1 Jahr 0 Monate</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>17.06.2013</b>                                                                                                          | <b>16.06.2015</b>                                                                                                                                                                                                                             | <b>6</b>                                                                            |                                    |                 |
| Zwischenberichte                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 13.01.2014                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |                                    |                 |
| <b>Bewilligungsempfänger</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            | <b>Grunewald GmbH&amp;Co.KG</b><br>Biemenhorster Weg 19<br>46395 Bocholt                                                                                                                                                                      |                                                                                     | Tel                                | 02871-2507-0    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     | Fax                                | 02871-2507-900  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     | Projektleitung<br>Ulrich Grunewald |                 |
| <b>Kooperationspartner</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                            | Westfälische Hochschule Gelsenkirchen Bocholt Recklinghausen<br>Neidenburger Str. 43<br>45897 Gelsenkirchen                                                                                                                                   |                                                                                     |                                    |                 |
| <b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |                                    |                 |
| Konkretes Ziel der hier beantragten Machbarkeitsstudie ist die Verbesserung der Kühlung von Formwerkzeugen für Teppichböden mit Schwerschicht, hinterschäumten Sandwichtaufbauten z. B. für Türen sowie für zu formende Komponenten aus Naturmaterialien im Automobilbereich. Die Kühlung von Formwerkzeugen beeinflusst maßgeblich die Taktzahl und damit die Effizienz, mit der in der Produktion Produkte geformt werden können. Durch die Erhöhung der Taktzahl bei der Ausformung von Produkten wird mit einer maßgeblichen Effizienzsteigerung gerechnet. Dies wiederum führt zu Ressourcenschonung und Energieeinsparung. |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |                                    |                 |
| <b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |                                    |                 |
| Arbeitspaket                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Thema                                                                                                                      | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                  | Verantwortliche/r                                                                   |                                    |                 |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Bereitstellung Form und Abwicklung                                                                                         | Abwicklung eines repräsentativen Ausschnitts eines typischen Formwerkzeugs zur Schaffung einer planen Fläche für das Einbringen einer Kühlkanalstruktur nach dem FracTherm®-Prinzip                                                           | Antragsteller<br>Grunewald GmbH & Co. KG                                            |                                    |                 |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Geometrieentwicklung mit FracTherm®                                                                                        | Entwicklung einer Geometrie mit FracTherm® zur Gestaltung der Kühlstrukturen eines typischen Formwerkzeugs                                                                                                                                    | Unterauftrag<br>2FhG/Hermann                                                        |                                    |                 |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Einbringen bisheriger Erkenntnisse, Simulationsrechnungen                                                                  | Untersuchung der Kühleigenschaften von konventioneller Kühlung im Vergleich zu bionischer Kühlung mit FracTherm®<br><br>Einbringen der bisherigen Ergebnisse / Erkenntnisse zur Optimierung der Kühldauer                                     | Unterauftrag<br>1ABmaxx UG/<br>Ossendoth                                            |                                    |                 |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Literaturrecherche Kühlung in der Natur                                                                                    | Die Verbindung zwischen thermischen Fenstern bei Tieren und Pflanzen soll im Fokus der Recherche stehen, um mögliche Prinzipien für die Ausgestaltung der Kühlung verschiedener Wärmenester abzuleiten.                                       | Projektpartner<br>Westfälische Hochschule/<br>Beismann                              |                                    |                 |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Umsetzung in Demoform mit Kanälen                                                                                          | Entwurf einer vereinfachten Form mit typischen Problembereichen üblicher Formwerkzeuge.                                                                                                                                                       | Antragsteller<br>Grunewald                                                          |                                    |                 |
| Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |                                    |                 |

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Verzeichnis von Bildern und Tabellen .....                                               | 3  |
| Verzeichnis von Begriffen und Definitionen.....                                          | 5  |
| 1. Zusammenfassung.....                                                                  | 6  |
| 2. Einleitung.....                                                                       | 7  |
| 3. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden.....                     | 11 |
| 3.1. Literaturrecherche: Kühlung in der Natur .....                                      | 11 |
| 3.1.1. Einbringen bisheriger Erkenntnisse und Simulationsrechnungen .....                | 12 |
| 3.2. Entwicklung, Herstellung, Test und Simulation des Demonstrationswerkzeuges .....    | 12 |
| 3.2.1. Bereitstellung der Formkontur und Abwicklung der Werkzeugoberfläche .....         | 12 |
| 3.2.2. Geometrieentwicklung mit FracTherm® .....                                         | 15 |
| 3.2.3. Herstellung des Demonstrationswerkzeugs mit Kanälen .....                         | 17 |
| 3.3. Ergebnisse des Projektes .....                                                      | 18 |
| 3.3.1. Ergebnisse der Literaturrecherche .....                                           | 18 |
| 3.3.2. Versuche mit dem Demonstrationswerkzeug .....                                     | 20 |
| 3.3.3. Versuchsreihe 1: Auswertung über Temperaturfühler .....                           | 21 |
| 3.3.4. Versuchsreihe 2: Auswertung über Temperaturfühler und Thermografieaufnahmen ..... | 24 |
| 3.3.5. Versuche mit dem Demonstrationswerkzeug und begleitende Simulationen .....        | 31 |
| 3.3.6. Finite-Elemente-Simulation des Demonstrations-Werkzeugs .....                     | 35 |
| 3.3.7. Ergebnisse aus konstruktiver und fertigungstechnischer Betrachtungsweise.....     | 38 |
| 3.4. Diskussion der Ergebnisse .....                                                     | 39 |
| 3.5. Bewertung der Ergebnisse .....                                                      | 41 |
| 3.5.1. Ökologische Betrachtung der Projektergebnisse .....                               | 41 |
| 3.5.2. Technologische Betrachtung der Projekt-Ergebnisse .....                           | 42 |
| 3.5.3. Ökonomische Betrachtung der Projektergebnisse.....                                | 42 |
| 3.6. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....                              | 42 |
| 4. Fazit .....                                                                           | 43 |
| 5. Literaturverzeichnis.....                                                             | 44 |
| 6. Anhänge.....                                                                          | 46 |

## **Verzeichnis von Bildern und Tabellen**

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Beispielhafter Prozess zur Herstellung eines Teppich-Einbauteils (am Beispiel einer Radhausverkleidung) .....                                 | 7  |
| Abbildung 2: Strukturen für die Kühlung von 2D-Komponenten .....                                                                                           | 8  |
| Abbildung 3: CAD-Konstruktion des Original-Werkzeugteils (links) und des Demonstrationswerkzeuges (rechts) .....                                           | 13 |
| Abbildung 4: Entwicklungsschritte bei der Erzeugung der CAD-Konstruktion des Demonstrationswerkzeuges .....                                                | 13 |
| Abbildung 5: Abgewinkelte zweidimensionale Rückseite der Konturfläche im CAD-System .....                                                                  | 14 |
| Abbildung 6: Projizierung der zweidimensionalen FracTherm®-Kanalsysteme auf die Rückseite der Werkzeugkontur .....                                         | 14 |
| Abbildung 7: Fertiggestelltes FracTherm®-Kanalsystem im Gesamtwerkzeug (Ansicht der Rückseite der Konturseite) .....                                       | 15 |
| Abbildung 8: Schnittdarstellung des Aufbaus der Werkzeugschalen .....                                                                                      | 15 |
| Abbildung 9: Mögliche und nicht mögliche Ein- und Auslasspositionen einer FracTherm-Struktur ....                                                          | 16 |
| Abbildung 10: Einfluss der FracTherm®-Parameter auf das Aussehen der Kanalstruktur .....                                                                   | 16 |
| Abbildung 11: Unterschiedliche Verzweigungsgeometrien: a) spitz, b) rund, c) parabelförmig .....                                                           | 16 |
| Abbildung 12: Aus den fünf Einzelflächen erzeugte FracTherm®-Strukturen .....                                                                              | 17 |
| Abbildung 13: Fertiggestellte Konturschale mit rückseitig gefrästen Kanälen (die Konturseite liegt in der Abbildung unten) .....                           | 17 |
| Abbildung 14: Fertiggestellte Demonstrationsform .....                                                                                                     | 18 |
| Abbildung 15: Demonstrationswerkzeug mit vier FracTherm®-Strukturen und 22 Positionen der Temperaturfühler .....                                           | 21 |
| Abbildung 16: Abkühlkurven aller acht ausgewerteten Temperaturfühler .....                                                                                 | 21 |
| Abbildung 17: Abkühlkurven von drei Temperaturfühler in FracTherm®-Kanalstruktur 1 .....                                                                   | 22 |
| Abbildung 18: Abkühlkurven von zwei Temperaturfühler in FracTherm®-Kanalstruktur 2 .....                                                                   | 22 |
| Abbildung 19: Abkühlkurven von drei Temperaturfühler in FracTherm®-Kanalstruktur 3 .....                                                                   | 23 |
| Abbildung 20: Abkühlkurven von acht Temperaturfühler in FracTherm®-Kanalstruktur 1 und 2 .....                                                             | 23 |
| Abbildung 21: Vergleich der Temperaturkurven für FracTherm®-Kanalstruktur 1 in Versuch 1 und 2 .....                                                       | 24 |
| Abbildung 22: Vergleich der Temperaturkurven für FracTherm®-Kanalstruktur 2 in Versuch 1 und 2 .....                                                       | 24 |
| Abbildung 23: Aufgebautes Werkzeug mit probeweise besprühter Ecke (gelber Kreis) zur Erzeugung eines hohen Emissionsgrades .....                           | 25 |
| Abbildung 24: Durchströmungsschema des 1. Versuchs .....                                                                                                   | 25 |
| Abbildung 25: Thermografiesequenz des 1. Versuchs .....                                                                                                    | 26 |
| Abbildung 26: Durchströmungsschema des 2. Versuchs (identisch mit 1. Versuch) .....                                                                        | 26 |
| Abbildung 27: Thermografiesequenz des 2. Versuchs .....                                                                                                    | 27 |
| Abbildung 28: Abkühlkurven der Temperaturfühler in Versuch 2 .....                                                                                         | 27 |
| Abbildung 29: Durchströmungsschema des 3. Versuchs (Zu- und Ablaufpositionen gegenüber 1. und 2. Versuch getauscht) .....                                  | 28 |
| Abbildung 30: Thermografiesequenz des 3. Versuchs .....                                                                                                    | 28 |
| Abbildung 31: Abkühlkurven der Temperaturfühler in Versuch 3 .....                                                                                         | 29 |
| Abbildung 32: Durchströmungsschema des 4. Versuchs (wie 3. Versuch, aber Ablauf rechts unten verschlossen und Zulauf rechts oben in Ablauf geändert) ..... | 29 |
| Abbildung 33: Thermografiesequenzen des 4. Versuchs (ca. 40 Sekunden Pause zwischen den Sequenzen) .....                                                   | 30 |
| Abbildung 34: Abkühlkurven der Temperaturfühler in Versuch 3 .....                                                                                         | 31 |
| Abbildung 35: Einbauorte der Pt100-Sensoren: Grüne Punkte mit Kennziffer des Sensors, Einbau 5mm unterhalb der Werkzeugoberfläche .....                    | 31 |
| Abbildung 36: Kanalsegmente im vereinfachten Simulationsmodell .....                                                                                       | 32 |
| Abbildung 37: Verringerung des Kanalabstandes der Kanäle 5 bis 8 gegenüber 1 bis 4 .....                                                                   | 33 |
| Abbildung 38: Einsatz von Nanofluids : Links ohne Nanofluids, rechts mit Nanofluids .....                                                                  | 34 |

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 39: Abschalten des Kühlvorgangs mit berechneter mittlerer Temperatur der Schwerschicht .....                                                    | 35 |
| Abbildung 40: Die für die Simulation genutzte Werkzeugfläche (gelb eingekreist) .....                                                                     | 36 |
| Abbildung 41: Darstellung der Werkzeugflächen in der Finite-Elemente-Software (links konventionelle Kanalstruktur, rechts FracTherm®-Kanalstruktur) ..... | 36 |
| Abbildung 42: Abkühlung mit Hilfe der konventionellen Kanalstruktur .....                                                                                 | 37 |
| Abbildung 43: Abkühlung mit Hilfe der FracTherm®-Kanalstruktur.....                                                                                       | 37 |
| Abbildung 44: Ergebnis der Abkühldauer von 180°C auf 40°C.....                                                                                            | 38 |

## Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

|                          |                                                                                          |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2D                       | Zweidimensional                                                                          |
| 3D                       | Dreidimensional                                                                          |
| CAD                      | Computer-Aided-Design (computergestützte Konstruktion)                                   |
| CFD                      | Computational-Flow-Dynamics (numerische Strömungsmechanik)                               |
| Citavi                   | Software für die Verwaltung von Literatur                                                |
| FEM-Simulation           | Finite-Elemente-Simulation                                                               |
| FracTherm®-Kanalstruktur | Geometrischer Algorithmus, entwickelt am Fraunhofer ISE, Freiburg                        |
| IPC                      | International Patent Classification (Internationale Patent Klassifizierung)              |
| Multiphysics-Simulation  | Simulationskopplung                                                                      |
| Pt100-Sensor             | Platin-Messwiderstand mit einem Nennwiderstand von 100 $\Omega$ (Ohm) (Temperaturfühler) |

## 1. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie wird die Anwendung einer bionischen Kühlung von Formwerkzeugen für die Herstellung textiler Bauteile im Automobilbereich untersucht.

Kühlsysteme kommen in der Natur insbesondere bei Tieren, die ihre Körpertemperatur aktiv regeln können, vor. Aber auch bei Pflanzen oder sogar bei Tierbauten und Insekten kommen Kühlsysteme vor. Diese werden zusammenfassend als bionische Kühlung bezeichnet. Ziel der begleitenden Literaturrecherche war es daher, möglichst viel über natürliche Kühlsysteme zu erfahren, mit besonderem Fokus auf die Verbindung verschieden gekühlter bzw. durchströmter Strukturen. Insgesamt wurden knapp 200 Titel recherchiert, die das Thema „Kühlung“ in relevanter Weise wiedergeben. So ist die Nervatur der meisten Blätter als Vorbild für die effiziente Verteilung von Ressourcen in einer Fläche geeignet. Diese Vorbilder wurden im Wesentlichen auch bei der Umsetzung des FracTherm®-Algorithmus‘ genutzt. Als optimales System für die genannte Anwendung stellen sich sog. FracTherm®-Strukturen heraus, die mit Hilfe eines am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE entwickelten Algorithmus [30] erzeugt werden können. Dieser geometrische Algorithmus ist bei zweidimensionalen, ebenen Bauteilen in der Lage, mehrfach verzweigte Kanalstrukturen zu erzeugen, die eine gleichmäßige Durchströmung sowie einen geringen Druckverlust im Kühlmedium ermöglichen sollen. Diese Kanalstrukturen sind von den Leitbündelstrukturen von Blättern oder Blutgefäßen abgeleitet.

Die Herausforderung in dem Projekt ist die Anwendung einer zweidimensionalen Struktur auf ein flächiges, 3-dimensionales Bauteil. Im vorliegenden Fall wird die FracTherm®-Kanalstruktur in einem Werkzeug, welches zur Umformung eines Fahrzeug-Bodenteppichs eingesetzt wird, eingebracht. In mehreren Schritten werden mehrere zweidimensionale FracTherm®-Kanalstrukturen konstruktiv in die Werkzeugkontur eingebracht. Anschließend wird das Demonstrationswerkzeug mit den enthaltenen FracTherm®-Kanalstrukturen gießtechnisch realisiert und in verschiedenen Versuchsreihen getestet. Darüber hinaus wird eine FracTherm®-Kanalstruktur aus dem Werkzeug mittels einer Finite-Elemente-Simulation bewertet.

Als erstes sind fertigungstechnische Ergebnisse zu nennen, die einen hohen Wert für die Firma Grunewald GmbH & Co. KG darstellen, da sie neue Möglichkeiten in der Werkzeugauslegung eröffnen. Die Ergebnisse der Versuchsreihen wie auch der Simulation zeigen eine deutlich bessere Kühlung mit der FracTherm®-Kanalstruktur als mit dem aktuell eingesetzten System, welches aus Aluminiumguss mit eingegossenen Edelstahl-Kühlrohren besteht. Die Simulation einer FracTherm®-Kanalstruktur aus dem Werkzeug zeigt im Vergleich zum konventionellen System eine Halbierung der Kühlzeit. Allerdings erweist sich die Durchströmung der in diesem Projekt erzeugten FracTherm®-Kanalsysteme noch nicht als optimal. Dies kann an einem unzureichenden hydraulischen Abgleich innerhalb der FracTherm®-Strukturen bzw. zwischen den einzelnen FracTherm®-Strukturen, die über Sammelkanäle miteinander verbunden sind, liegen, insbesondere aufgrund der dreidimensionalen Kanalführung, die zu zusätzlichen Druckverlusten führt. Als weitere Ursache kommen Querströmungen durch Spalte zwischen Ober- und Unterteil des Werkzeugs in Betracht, die sowohl zwischen Kanälen innerhalb einer FracTherm®-Struktur als auch zwischen verschiedenen FracTherm®-Strukturen zu hydraulischen Kurzschlüssen führen können. Um die FracTherm®-Technologie für den Alltag des Werkzeugkonstruktors nutzbar zu machen und eine Hydraulikoptimierung zu ermöglichen, ist es zielführend, eine Weiterentwicklung vorzunehmen, die sich auf 2D-Flächen-, 3D-Flächen- und 3D-Volumen-Anwendungen erstreckt und eine Kopplung zu einer CFD- bzw. Multiphysics-Simulation ermöglicht. Mithilfe dieser Entwicklung ist die Erschließung von vielen weiteren Anwendungsbereichen möglich, sowohl für den Bereich Kühlung wie auch die Beheizung. Als Beispiele können Anwendungen wie Kunststoff-Spritzguss, Druckguss, Blasformen, Kohlefaseranwendungen usw. genannt werden. Des Weiteren kann das System für die Auslegung der Temperierung von Bauteilen eingesetzt werden, bspw. Motoren-Kühlung, Komponenten im Maschinenbau, Auslegung von Bauelementen usw.

Das Vorhaben wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unter dem Aktenzeichen 30156 gefördert.

## 2. Einleitung

Das Unternehmen Grunewald GmbH & Co. KG entwickelt und produziert für die Automobilbranche Formwerkzeuge für u. a. Teppichböden mit Schwerschicht (s. Abbildung 1), hinterschäumte Sandwichaufbauten für Türen sowie zu formende Komponenten aus Naturmaterialien. Die Kühlwerkzeuge dazu bestehen grundsätzlich aus einer Unterform und einer Oberform. Beide Formen können gekühlt werden. Die im Projekt angestrebte Art der Kühlung, d. h. die Anordnung von Kühlrohren oder Kühlkanälen, ist prinzipiell für alle Formwerkzeuge gleich. Somit können die in diesem Projekt angestrebten Ergebnisse für alle Formmaterialien verwendet werden. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich deshalb ohne Beschränkung der Allgemeinheit auf Teppichböden mit einer Schwerschicht.

In das Formwerkzeug für z. B. Teppichbodenteile für den Innenraum von Fahrzeugen werden die vorgeheizten, rechteckig zugeschnittenen Teppichstücke mit einer Temperatur von 160 °C eingelegt. Bei dieser hohen Temperatur ist die Schwerschicht des Teppichbodens (s. Abbildung 1) ausreichend gut formbar. Dabei liegt die Schwerschicht an der Seite, die im Formwerkzeug wassergekühlt ausgeführt wird. Auf der Florseite kann wegen der Luftschicht zwischen oberem Formwerkzeug und dem Flor nicht wirksam gekühlt werden.



Abbildung 1: Beispielhafter Prozess zur Herstellung eines Teppich-Einbauteils (am Beispiel einer Radhausverkleidung)

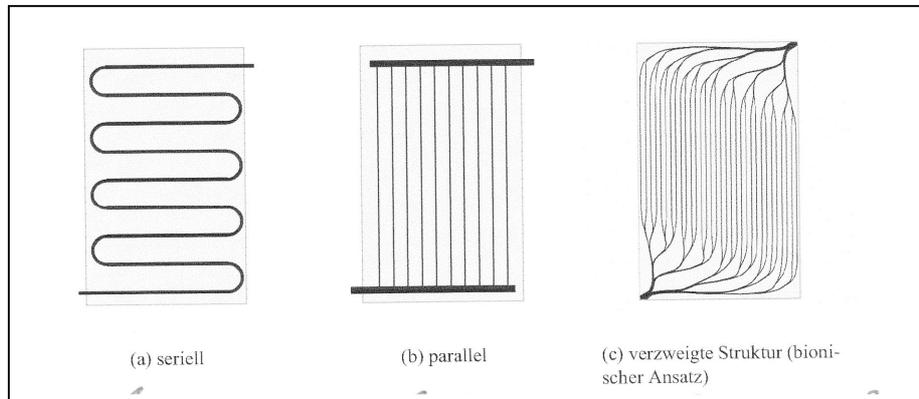
Nach Abkühlung von 160 °C auf 40 °C hält die Schwerschicht die Form des Teppich-Einbauteils (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der Abkühlvorgang bestimmt maßgeblich die Taktzeit der Prozesskette: Das Formwerkzeug ist der zeitliche Engpass in der Fertigung. Demzufolge heißt das Ziel der Entwicklung, die Taktzeit zu minimieren bei gesicherter Formbeständigkeit.

Die Menge an Wärme, die das Werkzeug und damit die Kühlung aufnehmen soll, ist örtlich verschieden, abhängig von der Form des Werkzeugs. Die Zone mit der schlechtesten Kühlung bestimmt die Taktzeit des Kühlwerkzeugs. Die Kühlwerkzeuge werden mit Wasser gekühlt. Das Kühlwasser tritt i. d. R. mit ca. 6 °C in das Werkzeug ein. Die Kühlrohre sind mäanderförmig verlegt, wie Abbildung 2 (linke Seite) beispielhaft zeigt.

Die oben dargestellten Randbedingungen und die mäanderförmig verlegten Kühlrohre mit einer Kühlwassertemperatur von 6 °C charakterisieren den Stand der Technik in der Branche. Die mäanderförmig verlegten Kühlrohre sind eine pragmatisch entwickelte Lösung, die heute noch erfolgreich ist, aber zukünftig nicht mehr den erhöhten Anforderungen gerecht werden wird. Die einzelnen Kühlkreisläufe sind lang und weisen Krümmungen bis zu 180° auf. Das bedeutet, dass der Strömungswiderstand groß ist, was eine hohe Pumpleistung erfordert, und dass die Kühlung bis zum Ende des Kreislaufs deutlich schlechter wird, weil der Kreislauf zu lang ist. Wegen des kleinsten Krümmungsradius von ca. 40 mm ist der Abstand der Kühlrohre mit 80 mm für eine effektive Kühlung oft zu groß. Alle diese Nachteile führen zwangsläufig dazu, dass der Betreiber mit möglichst hohem

Kühlwasserdurchsatz und möglichst kaltem Kühlwasser arbeitet. Auf den Energieverbrauch wird dabei in der Regel wenig geachtet.

Die bessere Lösung ist die sog. Harfenstruktur in Abbildung 2 (Mitte).



**Abbildung 2: Strukturen für die Kühlung von 2D-Komponenten**

Die Harfenstruktur ist Bestandteil der bisherigen Arbeiten zur Weiterentwicklung der Kühlsysteme für die Formwerkzeuge der Firma Grunewald. Die Harfenstruktur stellt eine deutliche Verbesserung dar, verglichen mit der mäandrierenden Verlegung von Kühlrohren. Jedoch hat auch diese Struktur einige Nachteile.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und Erfahrungen mit der Weiterentwicklung der Formwerkzeugkühlung bei Fa. Grunewald stellt sich eine Entwicklung auf der Grundlage eines bionischen Prinzips (Abbildung 2 rechts) wie folgt dar:

- Die bionische FracTherm<sup>®</sup>-Struktur ist darauf ausgelegt, gleichmäßig zu wärmen bzw. zu kühlen bei geringem Strömungswiderstand.
- Zur Umsetzung der Struktur sind Rohre weniger gut geeignet, weil die Rohrdurchmesser veränderlich sein müssten. Deshalb sollten in ein Kühlwerkzeug, das bisher aus Aluminium gegossen wird, Kanäle eingebracht werden, die ohne Probleme in der Breite oder in der Tiefe variabel sein können. Fa. Grunewald ist mit der eigenen Gießerei und daraus folgenden Erfahrungen in der Lage, solche Strukturen zu gießen.
- Der FracTherm<sup>®</sup>-Algorithmus verfolgt das Ziel, auf einer gegebenen Fläche ein verzweigtes, quasi fraktales Kanalnetzwerk zu erzeugen. Dabei werden einige Parameter verwendet, die einen Einfluss auf die erzeugte Geometrie haben können, z. B. auf die Kanalabstände, Kanalquerschnitte, Anzahl der Verzweigungen oder Krümmungsradien. Bisher ist der Algorithmus allerdings nur für 2D-Aufgaben vorgesehen. Die angedachte Lösung sieht vor, die 3D-Oberfläche des Formwerkzeugs abzuwickeln, um dann in dieser „Ebene“ die Kanäle zu planen. Es ist zu erwarten, dass bei stark zerklüfteten Profilen sinnvollerweise die Dicke der Form verändert wird, also die Form an der Unterseite „geglättet“ wird, um den Strömungswiderstand klein zu halten. Das erscheint möglich, da Aluminium einen geringen Wärmewiderstand hat und deshalb eine teilweise dickere Form nicht zwangsläufig zu deutlich schlechterer Kühlung führen muss.
- Der FracTherm<sup>®</sup>-Ansatz sieht bisher nur eine Zone vor, die gleichmäßig zu kühlen bzw. zu erwärmen ist. Das Formwerkzeug hat aber nachgewiesenermaßen Zonen, in denen die Abkühlung unkritisch ist – ebene Flächen – und solche Zonen, in denen sich Wärmenester – zerklüftetes Profil – bilden. Hier muss demzufolge mehr gekühlt werden. Es erscheint denkbar, das abgewickelte Werkzeug in einzelne Bereiche zu teilen, die in sich homogen gekühlt werden. Zonen mit Wärmenestern erhalten eine Kanalstruktur mit einem geringeren Abstand der Kühlkanäle.
- Die Aufteilung des Werkzeugs in mehre Zonen mit eigener Auslegung der Kanalstruktur erfordert es zu klären, wie der Übergang von einer Zone zur nächsten möglich ist und wie ein Hydraulikabgleich zwischen diesen Zonen realisiert werden kann

Die bisherige Kühlung von Formwerkzeugen wird über einfache Mäanderschlangen innerhalb des Aluminiumwerkzeugs, die durch eingegossene Edelstahlrohre erreicht wird, erzeugt. Durchströmendes Wasser sorgt für den kühlenden Effekt. Mit dem Werkzeug FracTherm® können diese Kühlrohre bzw. besser Kühlkanäle in völlig neuen Geometrien angelegt werden. Für die hier vorgelegte Machbarkeitsstudie wurde das bereits bestehende Rechenwerkzeug FracTherm® vom „Erfinder“ dazu genutzt, um einen repräsentativen Ausschnitt aus einem realen Formwerkzeug mit einer neuen Geometrie von Kühlkanälen auszustatten. Dabei wurde ein dreidimensionales Formwerkzeug so abgewickelt, dass eine ebene Fläche mit unterschiedlich geformten Teilflächen entsteht. Diese ebenen Teilflächen stellen mitunter Regionen des Formwerkzeugs mit unterschiedlichem Wärmeeintrag dar. Daher wurden diese verschiedenen Wärmegebiete mit unterschiedlichen Geometrien in Bezug auf Dichte und Abmessungen der einzelnen Kanäle ausgelegt. Zusätzlich soll ein Weg gefunden werden, diese unterschiedlichen Teilflächen wieder so zu verbinden, dass die Gesamteffizienz im Werkzeug nicht gestört wird. Hierbei soll bei natürlichen Vorbildern recherchiert werden, ob hier besondere Prinzipien abgeleitet werden können, um diese Verbindungen sinnvoll zu gestalten. Kühlung in der Natur kommt bei fast allen Lebewesen in unterschiedlicher Ausprägung vor. Oft müssen Tiere über die Oberfläche verschiedene sog. thermische Fenster aktiv nutzen, um die Körperwärme zu regulieren. Die Verbindung zwischen diesen thermischen Fenstern soll im Fokus der Recherche stehen, um mögliche Prinzipien für die Ausgestaltung der Kühlung verschiedener Wärmenester abzuleiten. Diese Recherche soll parallel zu der Ausgestaltung der Kühlkanalgeometrie durch FracTherm® erfolgen. Bei einfach umzusetzenden Verbindungsstücken kann dies direkt in die neue Geometrie mit aufgenommen werden. Bei möglicherweise komplizierteren Prinzipien in der Natur könnten diese Erkenntnisse dann direkt bei einer folgenden Umsetzungsstudie mit einfließen.

Die Machbarkeitsstudie hat den gesamten Prozess der Umsetzung einer neuen Geometrie in ein einfaches Werkzeug mit allen Teilaspekten, die bei der Herstellung eines für den Kunden bestimmten Werkzeugs notwendig sind, durchlaufen. Dazu zählen die Herstellung der Kontur des Werkzeugs, die Abwicklung der Form, die Herstellung einer entsprechenden Geometrie der Kühlkanäle mit FracTherm®, die Einarbeitung der Kanäle in das Werkzeug und entsprechende Tests. Zum Einbringen der Kanäle in das Kühlwerkzeug muss getestet werden, ob dies über entsprechende Fräsvorgänge erfolgt oder möglicherweise über generative Herstellungswege der Sandform für den Gießprozess.

- Bereitstellung Form und Abwicklung: Abwicklung eines repräsentativen Ausschnitts eines typischen Formwerkzeugs zur Schaffung einer planen Fläche für das Einbringen einer Kühlkanalstruktur nach dem FracTherm®-Prinzip
- Geometrieentwicklung mit FracTherm®: Entwicklung einer Geometrie mit FracTherm® zur Gestaltung der Kühlstrukturen eines typischen Formwerkzeugs
- Einbringen bisheriger Erkenntnisse, Simulationsrechnungen: Untersuchung der Kühleigenschaften von konventioneller Kühlung im Vergleich zu bionischer Kühlung mit FracTherm®
- Literaturrecherche Kühlung in der Natur: Die Verbindung zwischen thermischen Fenstern bei Tieren und Pflanzen soll im Fokus der Recherche stehen, um mögliche Prinzipien für die Ausgestaltung der Kühlung verschiedener Wärmenester abzuleiten.
- Umsetzung in Demonstrationsform mit Kanälen: Entwurf einer vereinfachten Form mit typischen Problembereichen üblicher Formwerkzeuge.

Die durchgeführte Machbarkeitsstudie nutzt das Verfahren FracTherm®, um eine neue Geometrie für die Verteilung von Kühlkanälen in einem Formwerkzeug zu generieren. Neu ist hier u. a. die Umsetzung für eine Form in allen drei Raumrichtungen. Dies ist bisher mit FracTherm® noch nicht umgesetzt worden und daher Neuland. Um dies zu erreichen, ist zunächst eine zweidimensionale Abformung der zu kühlenden dreidimensionalen Oberfläche geschaffen worden. Für diese planare Fläche ist auf unterschiedliche Teilflächen der FracTherm®-Algorithmus angewendet worden.

Da es sich bei den neu entwickelten Geometrien um deutlich komplexere Kühlkanalstrukturen als bei einem Mäander handelt, ist auch die Umsetzung in ein Formwerkzeug, ein Aluminiumgussteil, eine völlig neue Herausforderung.

Für die nationalen Kunden (Zulieferer in der Automobilbranche) bedeutet darüber hinaus ein effizienterer Einsatz von Produktionsmitteln einen Wettbewerbsvorsprung und den Erhalt von Arbeitsplätzen in Deutschland. Auch für den Antragsteller bedeutet es die Steigerung des Marktanteils durch Wettbewerbsvorsprung aufgrund innovativer und effizienter Formwerkzeuge und damit den Erhalt und Aufbau von Arbeitsplätzen in Deutschland.

Das durchgeführte Vorhaben kann in großem Maß zur Entlastung der Umwelt beitragen. Die wesentlichen Aspekte sind hierbei:

- Reduzierung des Energieverbrauchs bei der Herstellung von Fahrzeug-Interieur-Bauteilen durch effizienteres Kühlkonzept nach dem Vorbild der Natur mit dem weiterentwickelten FracTherm®-Verfahren
- Steigerung des Wirkungsgrades bzw. der Auslastung bereits existierender Produktionsanlagen
- Bessere Rezyklierbarkeit der hergestellten Werkzeuge durch Ersetzen der bisherigen Kühlrohre durch eingefräste oder gegossene Kühlkanäle

Grundsätzlich wird es mit dem FracTherm®-Verfahren erstmals möglich sein, Kühlkanäle hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen und anhand ihres Abstandes voneinander so zu planen, dass die Kanäle die Zone, in der sie liegen, gleichmäßig kühlen. Es leuchtet ein, dass der Abstand in den Zonen, die stark gekühlt werden müssen, kleiner gewählt wird als in den Zonen, in denen nicht mit Wärmenestern zu rechnen ist, also z. B. in flachen Gebieten des Kühlwerkzeugs. FracTherm® ermöglicht, nicht pauschal zu kühlen wie bisher, sondern gezielt zu kühlen.

Ein zweiter Aspekt für die Energieeinsparung ist der nachgewiesene deutlich geringere Strömungswiderstand der Kanäle relativ zu Rohren. Diese Energieeinsparung ist real, aber zu diesem Zeitpunkt nur mit hoher Ungenauigkeit anzugeben. Deshalb wird darauf verzichtet. Die Steigerung der Produktivität der Anlagen ist direkt abzuleiten aus der Abschätzung, dass die vorgeschlagene Kühlung zu einer Reduzierung der Kühldauer von 30 bis 50 % führen wird. Im Folgenden wird vorsichtig ca. 33 % angenommen, d. h. eine Reduzierung von 90 s auf 60 s. Die Anwendung von Kühlkanälen statt Kühlrohren ist nicht zu unterschätzen für das Recycling der Formwerkzeuge. Das Formwerkzeug wird aus Aluminium gegossen. Die Kühlrohre sind aus legiertem Stahl. Vor dem Einschmelzen müssten beide Materialien voneinander getrennt werden. Da die Rohre eingegossen sind, ist das nur ganz selten möglich. Das hat zur Folge, dass das Recycling bei diesen Formen nicht durchgeführt wird. Werden Rohre durch Kanäle ersetzt, kann die Form direkt eingeschmolzen werden.

### 3. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zunächst wird eine Literaturrecherche durchgeführt, um die in der Natur verwendeten Kühlsysteme zu evaluieren.

#### 3.1. Literaturrecherche: Kühlung in der Natur

Kühlsysteme kommen in der Natur insbesondere bei Tieren, die ihre Körpertemperatur aktiv regeln können, vor. Dies ist i. A. bei Vögeln und Säugetieren der Fall [1], [2]. Aber auch bei Pflanzen oder sogar bei Tierbauten (Termitenbauten, Präriehundebauten, Bienenstöcke) und Insekten [3] kommen Kühlsysteme vor. Dies geschieht letztlich, damit die notwendigen Stoffwechselfunktionen möglichst in einem optimalen Temperaturbereich ablaufen können. Maßgeblich sind hier in erster Linie Arbeiten zum Blutgefäßsystem, das man versucht hat mechanisch zu verstehen, insbesondere im Hinblick auf das nicht-lineare elastische Verhalten der Gefäße [4], und auch in dynamischen Modellen berechnet hat [5]. Für technische Anwendungen wurde schon früh versucht, Verzweigungen aus Blutkreislaufsystemen zu nutzen, um damit eine effizientere Durchflussleistung oder Kühlung zu erzielen und ein entsprechendes Patent angemeldet [6]. Aufbauend auf diesen Arbeiten konnte das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (Fraunhofer IWM) durch Hermann einen Algorithmus aufbauen, der ein künstliches Adersystem berechnet, das die gleichmäßige Durchströmung optimiert [7], [8], [9]. Ausgelegt ist der Algorithmus allerdings für eine flächige Struktur, also zweidimensional (2-D), die Herausforderung im Projekt war daher die Übertragung in ein dreidimensionales (3-D) Gebilde.

Ziel der begleitenden Literaturrecherche ist es daher, möglichst viel über natürliche Kühlsysteme zu erfahren, mit besonderem Fokus auf die Verbindung verschieden gekühlter bzw. durchströmter Strukturen. Es sollen dabei Hinweise darauf gefunden werden, wie diese unterschiedlichen Teilflächen verbunden werden können, so dass die Gesamteffizienz nicht gestört wird. Über die natürlichen Vorbilder soll geprüft werden, ob hier besondere Prinzipien abgeleitet werden können, um diese Verbindungen sinnvoll zu gestalten. Kühlung kommt in der Natur bei fast allen Lebewesen in unterschiedlicher Ausprägung vor. Oft müssen Tiere über die Oberfläche verschiedene sog. thermische Fenster aktiv nutzen, um die Körperwärme zu regulieren [10].

Die Verbindung zwischen diesen thermischen Fenstern soll im Fokus der Literaturrecherche stehen, um mögliche Prinzipien für die Ausgestaltung der Kühlung verschiedener Wärmenester abzuleiten. Diese Recherche findet parallel zu der Ausgestaltung der Kühlkanalgeometrie durch FracTherm<sup>®</sup> statt. Bei einfach umzusetzenden Verbindungsstücken kann dies direkt in die neue Geometrie mit aufgenommen werden. Bei möglicherweise komplizierteren Prinzipien in der Natur, können diese Erkenntnisse dann bei einer folgenden Umsetzungsstudie mit einfließen.

Durchgeführt wird die Literaturrecherche in allen gängigen und relevanten Datenbanken, die über die digitale Bibliothek der Westfälischen Hochschule erreichbar oder über Internetportale zugänglich sind. Schwerpunkte der Recherche sind Datenbanken mit der Kategorie Biologie oder für die Patentrecherche die Kategorie Patente. Aber auch verwandte Disziplinen wie z. B. Medizin werden bei der Auswahl berücksichtigt. Im Anhang A1 finden sich die genutzten Datenbanken.

Zur Sammlung und Verwaltung der gefundenen Literatur wird das Programm Citavi (Version 5.1) genutzt, das als Campuslizenz vorliegt. Die Recherche wird von Studierenden durchgeführt, die als studentische Hilfskräfte eingestellt worden sind. Regelmäßige Besprechungen für die Absprache der Suchwörter und der Einheitlichkeit der Literaturlisten werden mit Prof. Beismann durchgeführt. Die Sammlung und Kommunikation wird in einem Team-Projekt in Citavi durchgeführt, so dass alle beteiligten Personen gleichzeitig an der Sammlung und Auswertung beteiligt sein können. In einer mit E-Mail-Adresse gesicherten Dropbox werden die Ergebnisse abgelegt.

Die eingesetzten Suchbegriffe werden notiert und ständig erweitert. Eine Auflistung der Suchbegriffe und der Datenbanken in denen sie verwendet wurden, ist im Anhang A2 zu finden. Außerdem wurden die in der Patentdatenbank deposited genutzten IPC-Bereiche notiert in denen relevante Patente vermutet wurden und in Citavi eingearbeitet (s. Anhang A2).

### 3.1.1. Einbringen bisheriger Erkenntnisse und Simulationsrechnungen

Bisher werden alle Aluminium-Formwerkzeuge mit mäanderförmig verlegten Kühlrohren gekühlt. Wärmenester bilden sich in der unteren Hälfte steiler Flanken, wobei immer davon ausgegangen wird, dass die zu kühlende Schwerschicht des Autoteppichs anliegt.

- Auch dünne Luftpolster führen zu drastischer Erhöhung der Kühlzeit, weil der Wärmestrom in der Schwerschicht wegen des hohen thermischen Widerstands vernachlässigbar klein ist.
- Die Kühlung in zerklüfteten Bereichen des Werkzeugs ist wegen der dort besonders schwierigen Rohrverlegung deutlich schlechter als in der Ebene.
- Die Kühlung wird mit wachsender Länge des mäanderförmig verlegten Kühlrohres deutlich schlechter.
- Es ist noch nicht gelungen, die Temperatur in der Schwerschicht, die bei Erreichen von 40°C zum Beenden des Kühlprozesses führen soll, zuverlässig zu berechnen.
- Entscheidend für die Kühldauer ist, ob die Abkühlkurve steil genug ist, dass sie die Grenze von 40°C nicht erst im flachen Teil der Kühlkurve erreicht. Hier sei auf die beiden Abkühlkurven in Abbildung 44 verwiesen. Mit der mäanderförmig verlegten Kühlung kann nur eine Abkühlkurve erreicht werden, die im flachen Teil die Grenze von 40°C erreicht. Das erhöht die Kühlzeit beträchtlich.
- Simulationen haben gezeigt, dass die Kühlung mit 6°C-kaltem Kühlwasser am Rohreintritt die kürzeste Kühlzeit ergibt, dass aber eine Erhöhung der Kühlwassertemperatur auf 9°C bzw. 12°C nur zu einer Verlängerung der Kühldauer um 6% bzw. 14% führt. Das zeigt die Möglichkeit, mit einer höheren Kühlwassertemperatur nicht unbedingt wesentlich schlechtere Kühlzeiten zu erreichen, dafür aber Leistung für das Abkühlen des Kühlwassers nach dem Durchlauf durch das Werkzeug einzusparen.
- Eine Erhöhung der Durchflussmenge an Kühlwasser bringt keine wesentliche Verkürzung der Kühlzeit.
- Die einzige Maßnahme, die eine deutliche Verkürzung der Kühlzeit auf bis zu 30% (Simulation) ermöglicht, ist eine Harfenstruktur mit Kühlrohren oder Kühlkanälen, die es ermöglicht, die Kanäle deutlich enger nebeneinander anzuordnen, als das bei mäanderförmig verlegten Kühlrohren möglich ist, und die es ermöglicht, den Weg des Kühlwassers im Werkzeug deutlich kürzer zu halten. Damit kann die schlechte Kühlleistung der langen Rohre vermieden werden.
- Dies funktioniert in der Simulation dann, wenn die nebeneinander angeordneten Kanäle gleichmäßig mit Kühlwasser versorgt werden. Diese gleichmäßige Verteilung ohne aktive Pumpen und damit höheren Energieeinsatz ist in der Praxis - das haben Versuche gezeigt - nicht erreichbar.

Das Fazit aus den bisherigen Untersuchungen führt deshalb dazu,

- eine Kanalstruktur einzusetzen, die ohne Pumpen nahezu gleichmäßig mit Kühlwasser versorgt wird,
- die Kanäle nicht so lang auszulegen, dass die Kühlleistung im hinteren Teil zu schlecht wird,
- die kritischen Zonen gezielter zu kühlen,
- einen steilen Abfall der Abkühlkurve herbeizuführen, der noch im steileren Teil die Grenze von 40°C erreicht sowie die Temperatur in der Schwerschicht zuverlässiger zu berechnen anhand von Messung mit üblichen Messfühlern.

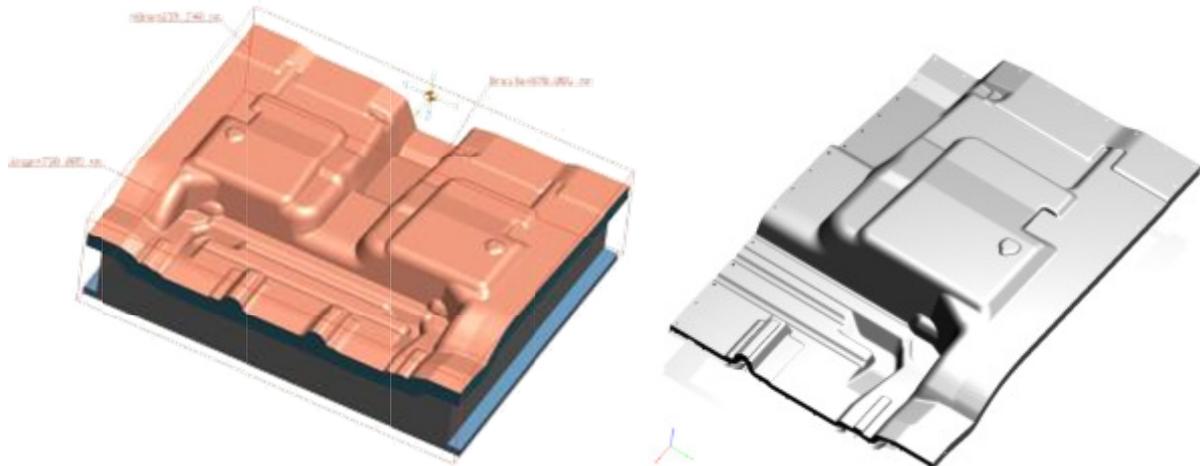
### 3.2. Entwicklung, Herstellung, Test und Simulation des Demonstrationswerkzeuges

In diesem Abschnitt wird der Weg aufgezeigt, wie das Demonstrationswerkzeug entwickelt, mit einer FracTherm®-Kanalstruktur versehen und gefertigt wird. Anschließend werden die verschiedenen Versuche sowie die Simulationen beschrieben.

#### 3.2.1. Bereitstellung der Formkontur und Abwicklung der Werkzeugoberfläche

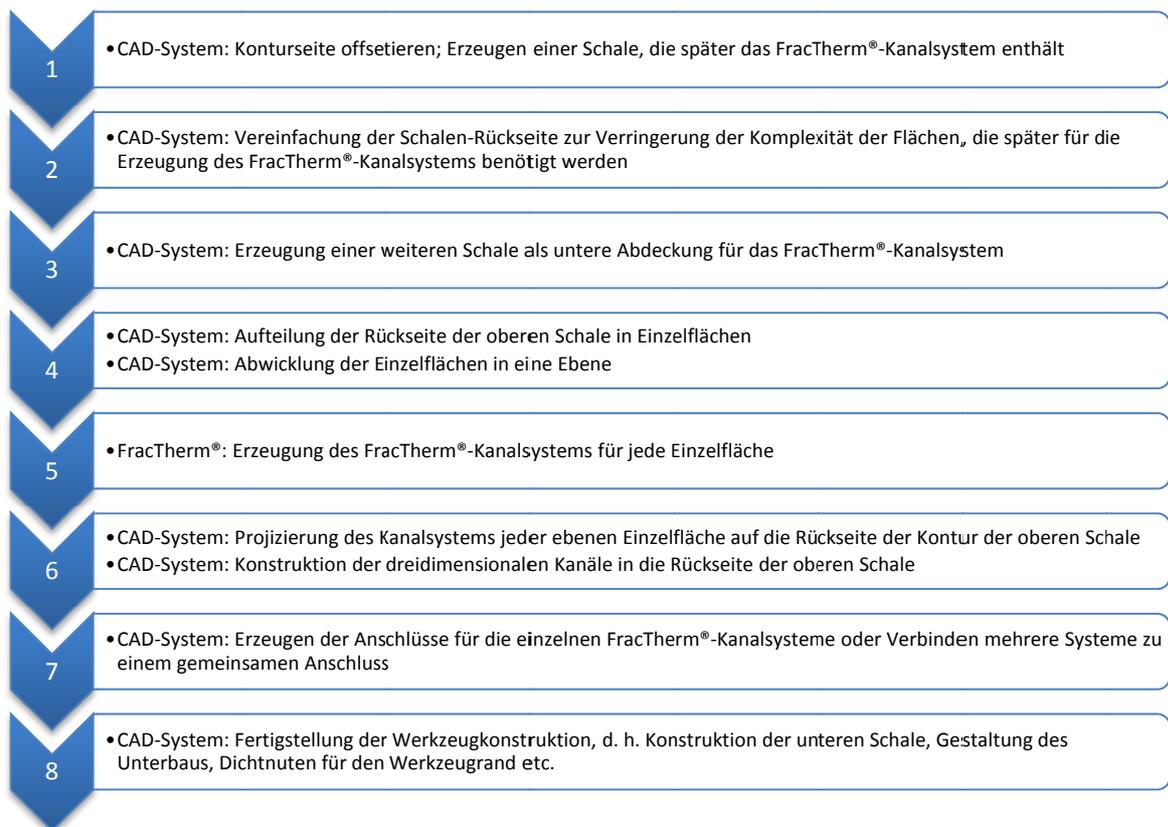
Die Konstruktion eines vorhandenen Formwerkzeuges für einen Bodenteppich dient als Grundlage für das Demonstrationswerkzeug. Die Konturseite (s. Abbildung 3) enthält sowohl flache, für die Kühlung unkritische, wie auch kritische Bereiche, die lange Kühlzeiten verursachen (bspw. steile

Flanken, komplizierte Übergänge). Da die Kontur nahezu symmetrisch ausgelegt ist, kann der Datensatz der gesamten Kontur in der Mitte getrennt werden. Diese Vorgehensweise ist für die Erzeugung der Ergebnisse absolut ausreichend und reduziert den Aufwand in Entwicklung, Konstruktion, Fertigung und Versuchsaufbau deutlich.



**Abbildung 3: CAD-Konstruktion des Original-Werkzeugteils (links) und des Demonstrationswerkzeugs (rechts)**

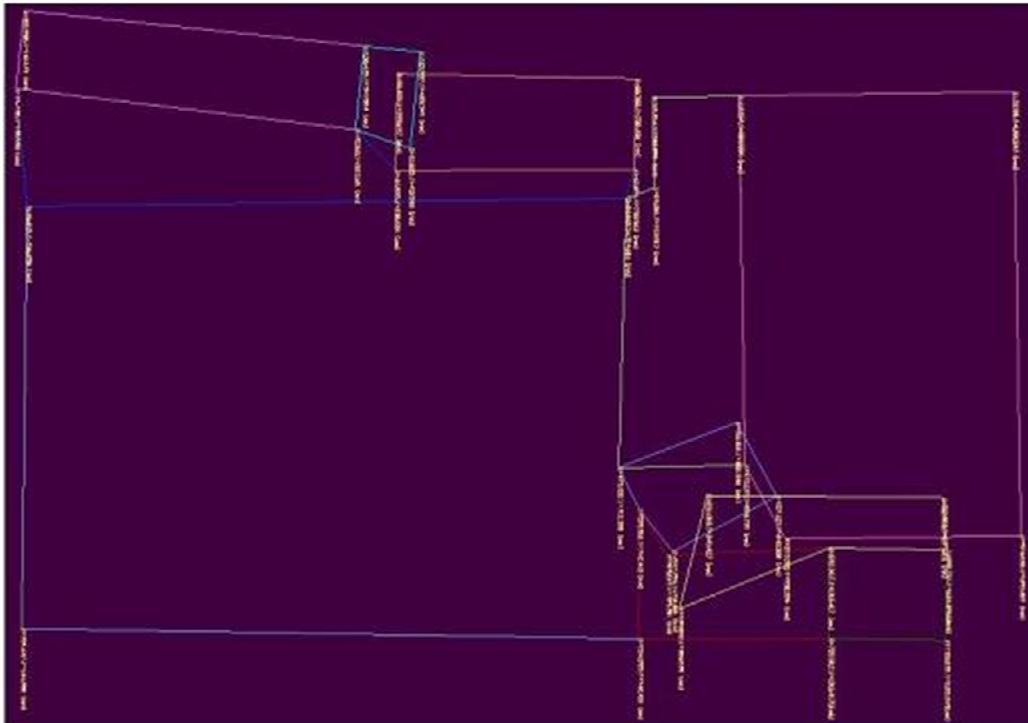
Der gesamte Prozess der Entwicklung und Konstruktion des Demonstrationswerkzeugs ist in der folgenden Übersicht (Abbildung 4) dargestellt.



**Abbildung 4: Entwicklungsschritte bei der Erzeugung der CAD-Konstruktion des Demonstrationswerkzeugs**

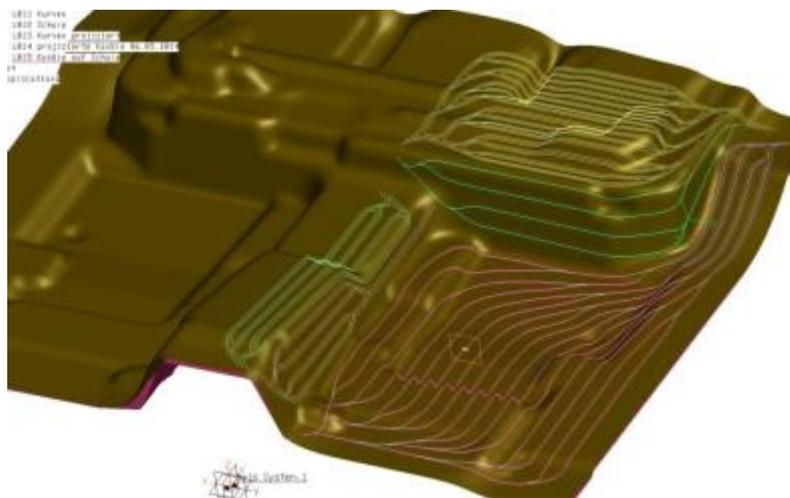
Die Rückseite der Konturfläche wird im CAD-System in verschiedene Bereiche unterteilt und anschließend abgewickelt, d. h. in eine Ebene gebracht. Daraus ergeben sich fünf zweidimensionale Flächen, die in Abbildung 5 dargestellt sind. Diese Einzel-Flächen dienen als Grundlage für die Auslegung der FracTherm®-Kanalstrukturen. Diese Vorgehensweise ist notwendig, um für die aktuell verfügbare zweidimensionale Version des FracTherm®-Algorithmus eine umsetzbare Geometrie-

Vorlage zu schaffen. Die Koordinaten der fünf zweidimensionalen Flächen werden an das Fraunhofer ISE übergeben.



**Abbildung 5: Abgewickelte zweidimensionale Rückseite der Konturfläche im CAD-System**

Am Fraunhofer ISE werden die Kanalstrukturen mittels des vorhandenen Algorithmus erzeugt (s. Kap. 3.2.2). Diese werden als fünf zweidimensionale Zeichnungen mit der Tiefe der Kanäle als zusätzliche Information an Grunewald zurückgegeben.



**Abbildung 6: Projizierung der zweidimensionalen FracTherm®-Kanalsysteme auf die Rückseite der Werkzeugkontur**

Im Anschluss werden die zweidimensionalen Strukturen am CAD-System auf die Rückseite der Werkzeugkonturschale projiziert (s. Abbildung 6) und mit der von FracTherm® vorgegebenen Kanaltiefe in das dreidimensionale Volumenmodell einkonstruiert (s. Abbildung 7). Dabei wird auf etwaige Druckverluste durch ungünstige Strömungsverläufe aufgrund der dreidimensionalen Struktur in diesem Projekt keine Rücksicht genommen. Weitere Erläuterungen dazu sind in Kapitel 3.2.2 zu finden.

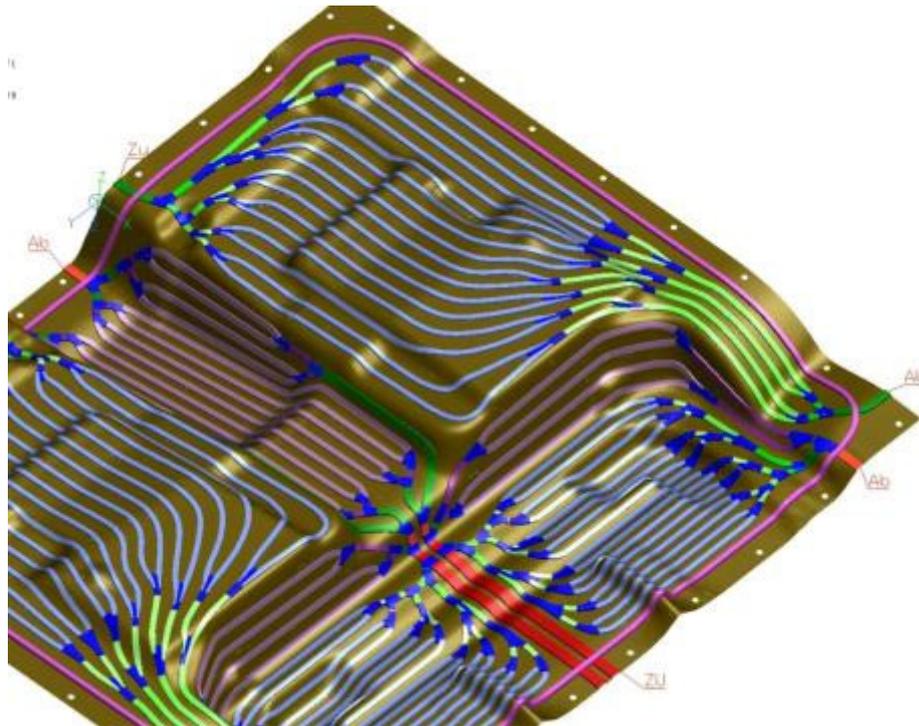


Abbildung 7: Fertiggestelltes FracTherm®-Kanalsystem im Gesamtwerkzeug (Ansicht der Rückseite der Konturseite)

In Abbildung 8 ist schematisch dargestellt, wie das Werkzeug aufgebaut wird. Die Kanalstrukturen finden sich relativ nahe zur Wirkfläche, der Konturoberseite.

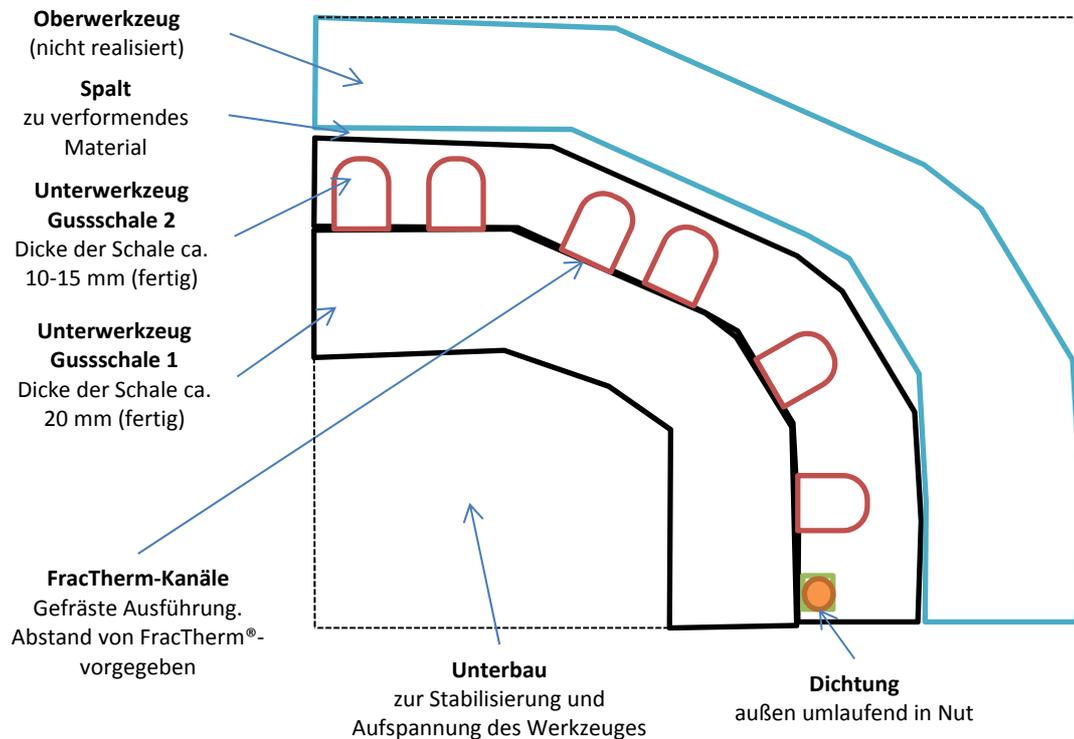


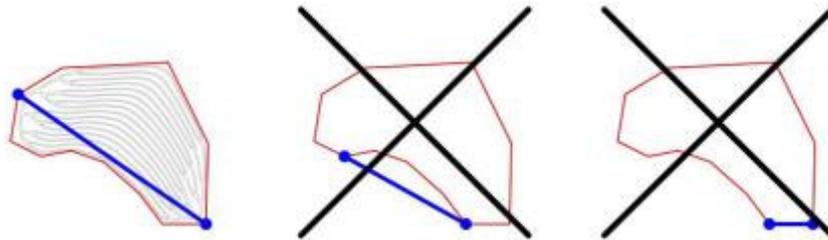
Abbildung 8: Schnittdarstellung des Aufbaus der Werkzeugschalen

Abschließend wird die CAD-Konstruktion des Werkzeuges fertiggestellt. Die Fertigung des Werkzeuges ist in Kapitel 3.2.3 dargestellt.

### 3.2.2. Geometrieentwicklung mit FracTherm®

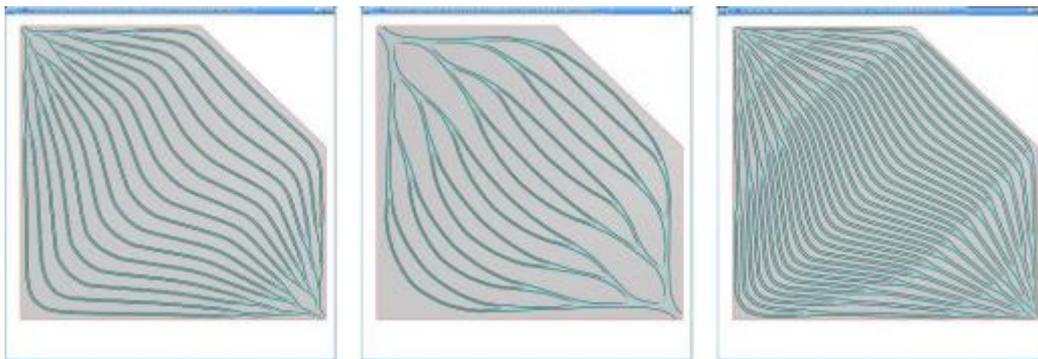
Am Fraunhofer ISE werden für die fünf Einzelflächen jeweils einzelne FracTherm®-Kanalstrukturen entwickelt. Hierfür müssen die ausgewählten Einzelflächen in einem ersten Schritt so angepasst bzw.

verkleinert werden, dass genug Raum für die spätere Konstruktion der Zu- und Abflüsse sowie die hydraulische Verbindung der einzelnen FracTherm®-Strukturen bleibt. In einem zweiten Schritt werden für jede der entsprechend angepassten Einzelflächen Ein- und Auslasspunkt so festgesetzt, dass eine hydraulisch sinnvolle Verbindung der einzelnen FracTherm®-Strukturen möglich ist. Der geometrische FracTherm®-Algorithmus schränkt dabei die Wahl von Ein- und Auslasspunkt zusätzlich ein (s. Abbildung 9).

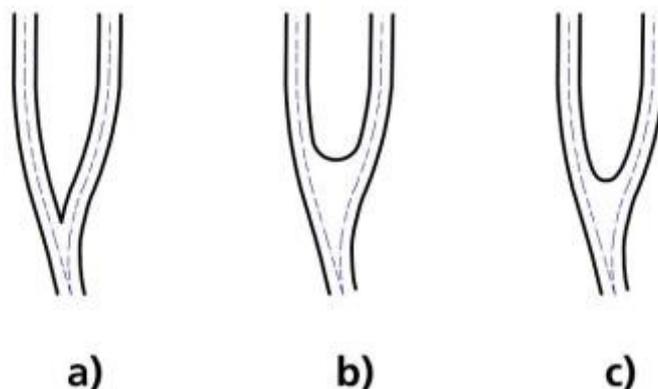


**Abbildung 9: Mögliche und nicht mögliche Ein- und Auslasspositionen einer FracTherm-Struktur**

Anschließend werden die fünf FracTherm®-Strukturen unter Einhaltung der vorgegebenen fertigungstechnischen Randbedingungen erstellt. Dabei können Geometrieparameter frei gewählt werden, wodurch sich Einflüsse auf die Durchströmung und den Druckverlust ergeben. Abbildung 10 zeigt, welche unterschiedlichen FracTherm®-Designs bei gegebenem Ein- und Auslasspunkt durch Variation der Parameter möglich sind. Neben Anzahl und Abstand der Verzweigungen ist hierbei z. B. auch die Form der Verzweigung festzulegen, wobei typischerweise die Parabelform gewählt wird (s. Abbildung 11).



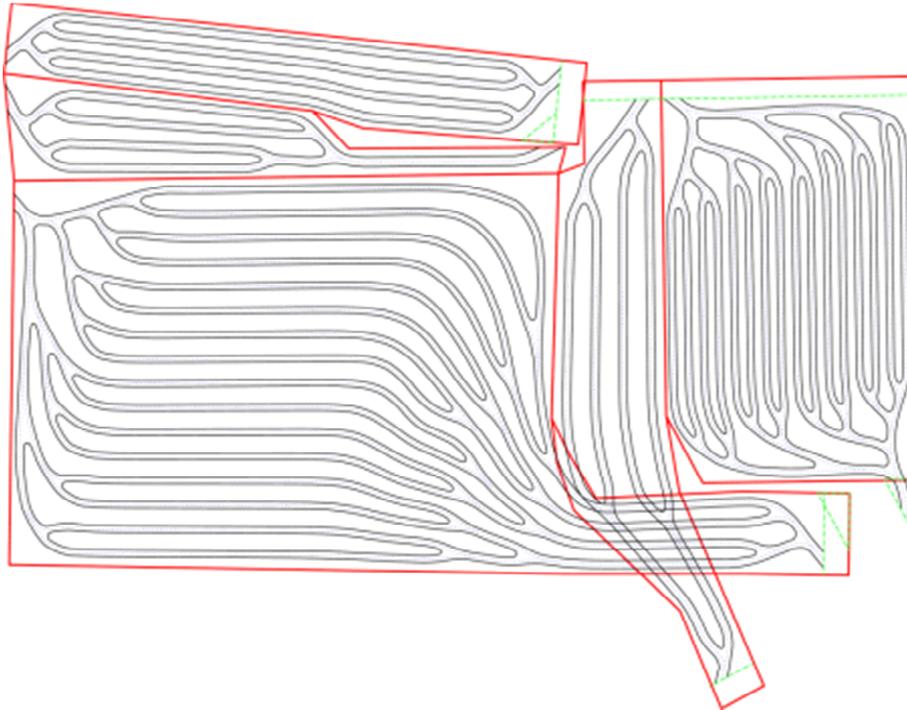
**Abbildung 10: Einfluss der FracTherm®-Parameter auf das Aussehen der Kanalstruktur**



**Abbildung 11: Unterschiedliche Verzweigungsgeometrien: a) spitz, b) rund, c) parabelförmig**

Nach der geometrischen Erstellung der FracTherm®-Strukturen erfolgt deren hydraulischer Abgleich. Dabei wird die Kanalbreite der einzelnen Kanäle so angepasst, dass eine möglichst gleichmäßige Durchströmung erfolgt. Die hydraulische Berechnung erfolgt dabei auf Grundlage eines einfachen 1-dimensionalen Knotenmodells unter Berücksichtigung der Kanalquerschnittsgeometrie und angenommener Druckverlustbeiwerte an den Verzweigungen. Um den hydraulischen Abgleich der fünf Einzelflächen durchzuführen, wird von einer flächenanteiligen Durchströmung der Einzelflächen ausgegangen (Gesamtvolumenstrom 8000 l/h). Der hydraulische Abgleich der Flächen untereinander kann nicht mithilfe des Programms erfolgen, sondern müsste nachträglich im Werkzeug (z. B. durch Regulierventile) durchgeführt werden.

Das Ergebnis der Erstellung der fünf Einzel- FracTherm®-Strukturen ist in Abbildung 12 dargestellt.



**Abbildung 12: Aus den fünf Einzelflächen erzeugte FracTherm®-Strukturen**

### 3.2.3. Herstellung des Demonstrationswerkzeugs mit Kanälen

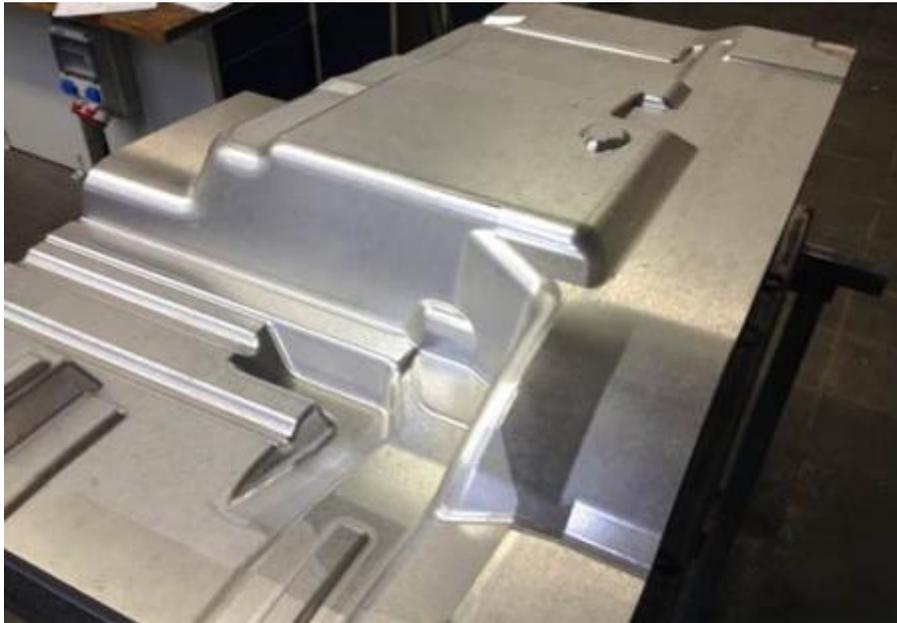
Aus den erzeugten CAD-Daten wird das Demonstrationswerkzeug hergestellt. Mittels Aluminium-Schwerkraftguss über sogenannte verlorene Modelle aus Polystyrol werden sowohl die Konturschale wie auch die untere Schale inkl. des Unterbaus gefertigt. In Abbildung 13 ist die Rückseite der Konturschale dargestellt. Das mittels mechanischer Bearbeitung auf einer 5achsigen Fräsmaschine eingebrachte FracTherm®-Kanalsystem ist deutlich zu erkennen.



**Abbildung 13: Fertiggestellte Konturschale mit rückseitig gefrästen Kanälen (die Konturseite liegt in der Abbildung unten)**

Das Werkzeug wird fertiggestellt, so dass es für Versuche genutzt werden kann. Die Konturschale wird mit der unteren Schale, die fest mit dem Unterbau verbunden ist, verschraubt und abgedichtet.

Es werden zusätzlich Positionen für Temperaturfühler eingebaut, um an diesen Stellen später die Temperatur messen zu können.



**Abbildung 14: Fertiggestellte Demonstrationsform**

Es wird aus Gründen der Vereinfachung keine zweite Werkzeughälfte hergestellt. Das Demonstrationswerkzeug wird in verschiedenen Versuchen aufgeheizt und mittels kaltem Wasser, welches durch die FracTherm®-Kanalstrukturen fließt, abgekühlt. Dabei werden sowohl Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera angefertigt wie auch die Auswertung der Temperaturfühler vorgenommen.

### **3.3. Ergebnisse des Projektes**

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Literaturrecherche und die Versuchsergebnisse dargestellt, die mit dem Demonstrationswerkzeug erzielt werden. Darüber hinaus werden die Simulationsergebnisse dargestellt, die die Analyse mit einem vereinfachten Simulationsmodell (s. Abschnitt 3.3.5) sowie die FEM-Analyse (vgl. Abschnitt 3.3.6) ergeben haben. Es werden zwei Versuchsreihen durchgeführt, während derer das Werkzeug entgegen der normalen Verwendung aufgeheizt und mittels der FracTherm®-Kanalsysteme heruntergekühlt wird. Während der beiden Versuchsreihen werden die Temperaturen mittels an verschiedenen Positionen angebrachter Pt100-Temperaturfühler ermittelt. Bei der zweiten Versuchsreihe wird eine Wärmebildkamera ergänzend zu Hilfe genommen.

#### **3.3.1. Ergebnisse der Literaturrecherche**

Insgesamt werden knapp 200 Titel recherchiert, die das Thema „Kühlung“ in relevanter Weise wiedergeben. Alle Titel werden in Citavi dokumentiert und ausgewertet. Um die Titel zunächst in eine Ordnung zu bringen, werden Kategorien erstellt, die eine Zuordnung zu einer oder mehreren Kategorien ermöglicht.

Auf der obersten Ebene werden die Titel den vier Kategorien: Biologie, Bionik, technische Kühlung und Patente zugeordnet.

In der Kategorie Biologie werden die Artikel den jeweiligen biologischen Arten zugeordnet. In der Kategorie Bionik werden bereits aus der Bionik entwickelte Systeme einsortiert. In der Kategorie technische Kühlung werden bereits existierende Systeme mit Relevanz zum Projekt benannt. Die Kategorie Patente enthält eine Übersicht aller gefundenen relevanten Patente im Bereich Kühlung.

Die Unter-Kategorien und die dazugehörigen Titel, sind in einer Übersichtstabelle im Anhang dargestellt. Eine farbliche Markierung hebt die besonders relevanten Titel hervor und illustriert die Funde mit einem plakativen Bild (Anhang A4). Die Quellen der Bilder sind genannt. Eine Anzahl von

bis zu 5 ausgefüllten Sternen kennzeichnet die Relevanz zusätzlich etwas feiner. Nur solche Titel werden in dieser Übersicht aufgenommen, die mindestens eine Bewertung von einem Stern erhalten hatten. Einige Titel sind in dieser Darstellung unter mehreren Kategorien zu finden.

Eine Gesamtliste der Literatur findet sich im Anhang (Anhang A3). Diese Liste ist nach dem Dokumententyp (Zeitschriftenaufsatz, Patentschrift, Hochschulschrift, Buch, Graue Literatur, Internetdokument) gegliedert. Die vorangestellten Nummern (#Nr.) entsprechen den eindeutigen Laufnummern im Literaturverwaltungsprogramm Citavi und machen eine eindeutige Zuordnung möglich. In der Übersichtstabelle der Literaturrecherche im Anhang A4 sind diese Nummern ebenfalls aufgeführt, so dass aus der Übersicht die genaue Literaturquelle nachgeschlagen werden kann.

In allen drei Reichen höherer Organismen (Pilze, Pflanzen, Tiere) existieren Systeme zur Kühlung bzw. allgemeiner zur Thermoregulation oder zumindest Verzweigungsstrukturen, die für eine Verteilung von Ressourcen sorgen, wie es insbesondere für Schleimpilze [11] beschrieben wurde. So ist die Nervatur der meisten Blätter als Vorbild für die effiziente Verteilung von Ressourcen in einer Fläche geeignet [12], [13], [14], [15]. Diese Vorbilder wurden im Wesentlichen auch bei der Umsetzung des FracTherm®-Algorithmus' genutzt [9]. Der Vorteil bei der Übertragung des biologischen Prinzips in eine technische Umsetzung ist sicher auch darin zu sehen, dass es sich hierbei um Kanalsysteme handelt, die keine Anpassung der Durchströmung durch eine Durchmesseränderung zeigen. Dies ist bei tierischen Gefäßsystemen immer der Fall und erschwert eine technische Umsetzung, da verschiedene Prinzipien gleichzeitig zum Tragen kommen.

Darüber hinaus haben Pflanzen Strukturen zur Wärmeabgabe entwickelt wie Haare [16], die offensichtlich auch bei Tieren eine Rolle spielen, z.B. bei Elefanten [17]. Diese Form der Flächenvergrößerung zur Optimierung der Wärmeabgabe ist aber für die oben genannte Fragestellung nicht relevant.

Dahingegen findet man bei Tieren sehr viele Angaben zu Blutkreislaufsystemen. Dabei nutzen eine Vielzahl von Tieren, das auch aus der Technik bekannte Gegenstromprinzip, um unterschiedlich temperierte Körperbereiche zu erzeugen. Viele große Wüstentiere können die Blutzirkulation so gestalten, dass das Gehirn nicht über eine letale Temperatur erhitzt wird, während das Blut des Körpers diese Grenze bereits überschritten hat. Hierzu wird das Blut des Körpers über einen Gegenstrommechanismus abgekühlt, bevor es das Gehirn erreicht. Dies ist z.B. bei Antilopen so [18], aber auch bei anderen großen Wüstentieren, die keinen Schutz vor der Sonne finden können, aufgrund ihrer Größe oder als Fluchttiere schnell große Strecken rennen müssen. Anders bei den Räubern, wie z.B. dem Geparden, der große Mengen an Wärme speichern kann. Sobald die Körpertemperatur aber 40,5 bis 41° erreicht, muss er aufhören zu rennen. Er erreicht damit eine theoretische Laufleistung im Sprint von max. einem Kilometer, diese Distanz entspricht den Beobachtungen in freier Natur [19]. Seine Beutetiere können aufgrund der Kühlung des Blutes bevor es das Gehirn erreicht eine längere Laufleistung erzielen [18].

Ähnliche Leistungen können bei Kamelen [20] oder See-Elefanten [21] beobachtet werden, die ebenfalls ein Gegenstromprinzip nutzen, wobei das Ziel hier nur sekundär die Kühlung des Blutstroms ist, primär soll der Wasserverlust durch die Atemluft dadurch verringert werden, dass die Atemluft jeweils so angepasst wird, dass möglichst wenig Wasserdampf verloren geht.

Weitere bezeichnende Gegenstromprinzipien werden von Delfinen genutzt. Da deren Hoden im Körperinneren liegen und dadurch die Spermien höheren Temperaturen ausgesetzt sind, werden die Hoden über ein Gegenstromprinzip mit kühlerem Blut aus den Flossenregionen gekühlt [22], [23].

Während Delfine und andere Meeressäuger sich ständig im Wasser aufhalten und dadurch keine großen Temperaturschwankungen zu meistern haben, sind Robben und Seeelefanten durch Ihre Abhängigkeit von Landgängen viel größeren Temperaturschwankungen ausgesetzt.

Thermoregulation wird in diesen Tieren über ein dichtes Blutgefäßnetz im Bereich der hinteren Flossen gewährleistet, um im Fall von Hitzestress an Land, schnell Wärme abgeben zu können, während im Wasser eine zu große Abgabe von Wärme durch Konstriktion der Gefäße vermieden wird [24].

Weitere Autoren haben in späteren Arbeiten zu Robben [25], zumindest bei einigen Arten beobachtet, dass insbesondere arteriovenöse Anastomosen (Anastomosen: Verbindung zwischen anatomischen Strukturen) für die Regulation der Temperatur von Bedeutung sind. Insbesondere werden durch das Öffnen oder Schließen dieser Anastomosen thermische Fenster reguliert, um Temperatur abzugeben oder die Abgabe zu vermindern. Ähnliches wurde für Seekühe beschrieben, die darauf spezialisiert sind, keine Wärme zu verlieren, in den heißen Sommermonaten in Florida aber über Anastomosen das warme Körperblut, das über Gegenstromprinzipien auf Temperatur gehalten wird, direkt an die Oberfläche bringen können, um Wärme abgeben zu können [26]. Deutlichstes Beispiel eines aktiv genutzten thermischen Fensters findet sich bei einer Fledermausart, die über große Distanzen und in sehr unterschiedlichen Flughöhen nach Nahrung sucht. Über ein Adersystem an der Basis der Flügel kann Wärme bei Langstreckenflügen abgegeben werden. Während sie sich in kühleren Regionen aufhält, kann dieses Adersystem vermindert durchblutet werden und eine Wärmeabgabe damit verhindert werden [10].

Viele größere Landtiere können darüber hinaus auch Wärme speichern und sie dann z.B. über Nacht wieder abgeben, wie es beim Asiatischen Elefanten [2] oder Kamel [20] nachgewiesen wurde.

In jüngster Zeit wurde insbesondere die Wirkung von Nanopartikeln auf die thermischen Eigenschaften von Flüssigkeiten untersucht. Unter diesen „Nanofluids“ werden Flüssigkeiten verstanden (z.B. Salzlösungen), die mit Nanopartikeln angereichert werden. Als Nanopartikel können z.B. Siliziumoxide, Aluminiumoxide, Titandioxid, verschiedene Metalloxide oder Metalllegierungen, sowie auch Kohlenstoffnanopartikel in Frage kommen [27], [28], [29]. Insgesamt zeigen diese Zusätze eine deutliche Änderung der Wärmekapazität und damit einhergehend eine deutlich verbesserte thermische Leitfähigkeit, abhängig von Menge und Art der eingesetzten Nanopartikel [29].

### **3.3.2. Versuche mit dem Demonstrationswerkzeug**

Mit dem hergestellten Demonstrationswerkzeug werden verschiedene Versuche durchgeführt. Zu diesem Zweck wird das Werkzeug über die Kanäle mit Wasser auf eine bestimmte Ausgangstemperatur aufgeheizt, die im vorliegenden Fall ca. 75 °C. Im Anschluss wird ca. 9 °C kaltes Wasser durch die Kanäle gepumpt und über die eingebauten Temperaturfühler sowie Thermografieaufnahmen (nur in der zweiten Versuchsreihe) ausgewertet. Das Demonstrationswerkzeug besitzt vier FracTherm®-Kanalstrukturen. Es sind rückseitig 22 Bohrungen angebracht, in die bis zu acht Temperaturfühler eingeschraubt werden können (s. Abbildung 15). Die Auswerte-Einheit kann Signale von maximal acht Temperaturfühlern gleichzeitig verarbeiten.

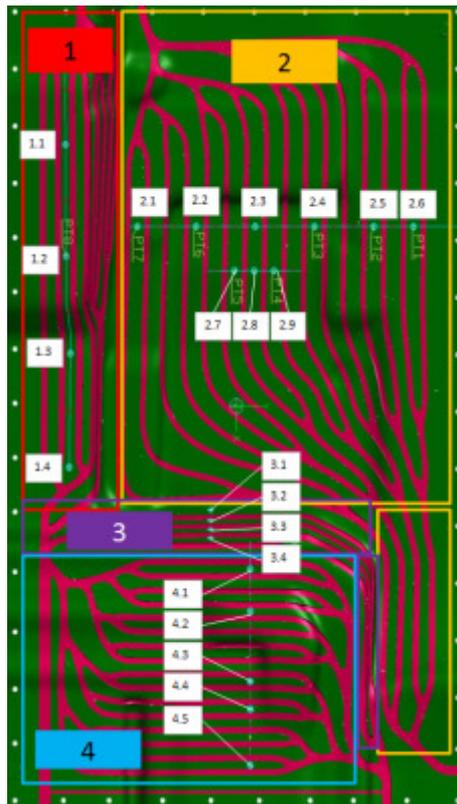


Abbildung 15: Demonstrationswerkzeug mit vier FracTherm®-Strukturen und 22 Positionen der Temperaturfühler

Die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 3.3.3. Versuchsreihe 1: Auswertung über Temperaturfühler

In der ersten Versuchsreihe wurde die grundsätzliche Funktionalität des Demonstrationswerkzeugs getestet. Dazu werden wie oben beschrieben maximal acht Temperaturfühler in verschiedenen Positionen eingebaut und ausgewertet. Dazu werden zwei Versuche durchgeführt.

#### Versuch 1:

In Versuch 1 ergeben sich folgende Abkühlkurven (s. Abbildung 16).

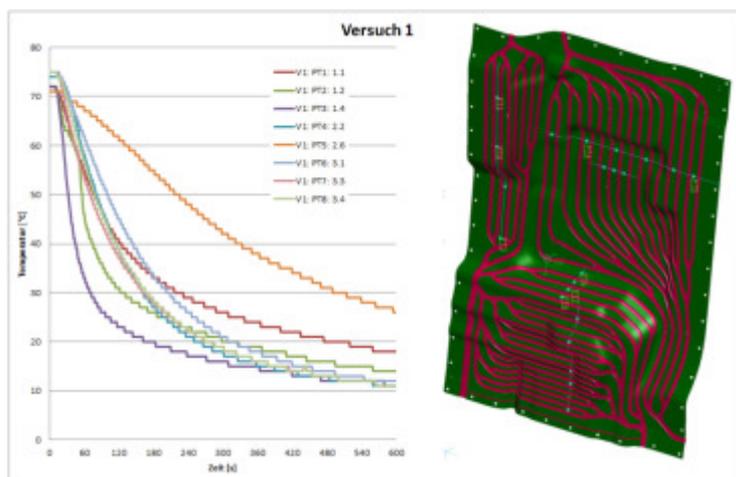
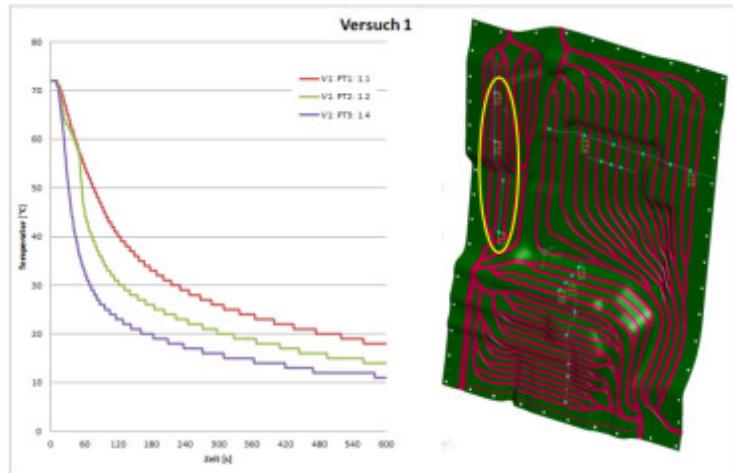


Abbildung 16: Abkühlkurven aller acht ausgewerteten Temperaturfühler

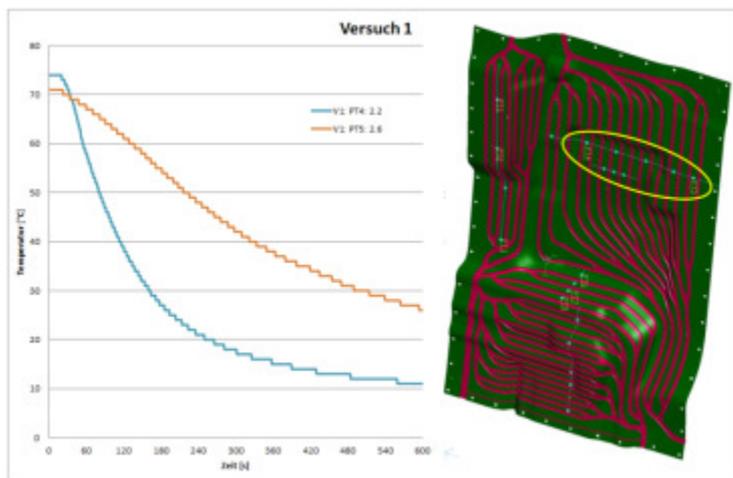
Die Kurven zeigen einen zu Beginn steilen Verlauf, d. h. die Abkühlung startet schnell und wird dann langsamer. Dies entspricht dem gewünschten Verlauf, damit die Abkühlung der Bauteile möglichst schnell erfolgen kann. Eine Ausnahme bildet der Temperaturfühler PT 5 (orange Kurve in Abbildung 16), dessen Kurve relativ flach verläuft. Die Ursachen dafür können in Massenanhäufungen in der Nähe des Temperaturfühlers liegen; die senkrechte Werkzeugwand liegt in der Nähe des Fühlers und

es liegt die Vermutung nahe, dass von dort gespeicherte Wärme in die abkühlenden Bereiche nachströmt. Die folgenden drei Grafiken zeigen die Abkühlkurven für einzelne FracTherm®-Kanalstrukturen (Abbildung 17 bis Abbildung 19).



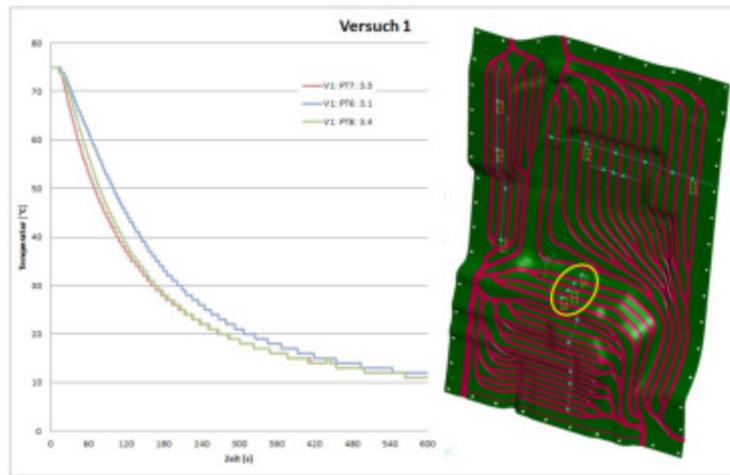
**Abbildung 17: Abkühlkurven von drei Temperaturfühlern in FracTherm®-Kanalstruktur 1**

Die Kurven laufen fast parallel. Allerdings sind die gemessenen Temperaturunterschiede von bis zu 20 °C zur gleichen Zeit sehr hoch. Die Ursachen hierfür liegen sowohl in unterschiedlichen Geometrien, die gekühlt werden müssen wie auch an der Nähe des Temperaturfühlers zum Ablauf. Die Masseanhäufungen werden verursacht durch senkrechte Werkzeugwände unterhalb der Fühler, insbesondere bei dem durch die rote Kurve in Abbildung 17 dargestellten Temperaturfühler, der relativ nahe zur Ecke des Werkzeugs liegt, an der zwei Wände aufeinandertreffen. Außerdem liegt dieser Temperaturfühler in der Nähe des Ablaufs, d. h. das Wasser hat bereits Wärmeenergie aus den vorangegangenen Teilstücken des Aluminiums aufgenommen.



**Abbildung 18: Abkühlkurven von zwei Temperaturfühlern in FracTherm®-Kanalstruktur 2**

In Abbildung 18 fällt insbesondere der ungewöhnliche Verlauf der orangenen Kurve auf. Die vermutlichen Ursachen werden zu Beginn des Kapitels 3.3.3 erläutert.

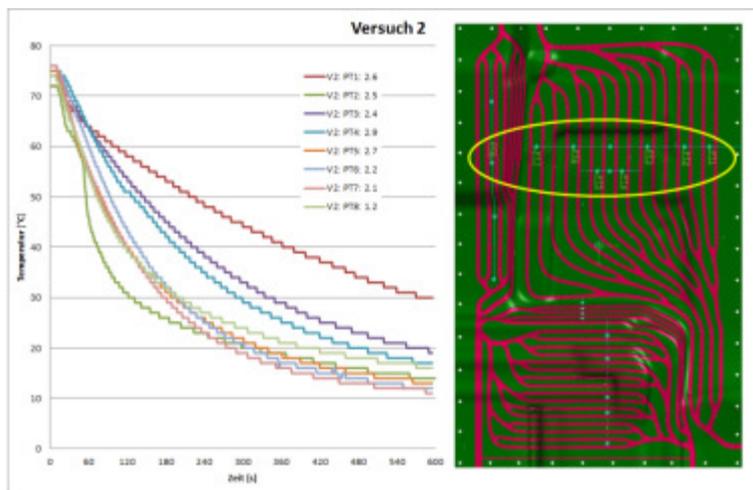


**Abbildung 19: Abkühlkurven von drei Temperaturfühlern in FracTherm®-Kanalstruktur 3**

Die Auswertung der Temperaturfühler der Kanalstruktur Nr. 3 (s. Abbildung 19) zeigen ein sehr gleichmäßiges Bild. Dies scheint ein Hinweis auf gleichmäßige zu kühlende Massen in der Nähe der Temperaturfühler sowie gleichmäßige Durchströmung zu sein.

### Versuch 2:

Bei dem zweiten Versuch wurden die Positionen der Temperaturfühler geändert; alle anderen Parameter werden beibehalten. Bis auf einen Temperaturfühler (PT 8, hellgrüne Kurve in Abbildung 20) liegen alle in der FracTherm®-Kanalstruktur Nr. 2, da diese im ersten Versuch eine Kurve enthielt, die einen ungewöhnlichen Verlauf darstellte (s. Abbildung 18, PT 5, orange Kurve).



**Abbildung 20: Abkühlkurven von acht Temperaturfühlern in FracTherm®-Kanalstruktur 1 und 2**

Wie man Abbildung 20 entnehmen kann, bleibt der Verlauf der Temperaturkurve des betreffenden Temperaturfühlers in Versuch 2 identisch. Der Vergleich der beiden Versuche wird im folgenden Absatz beschrieben.

## Vergleich Versuch 1 und Versuch 2:

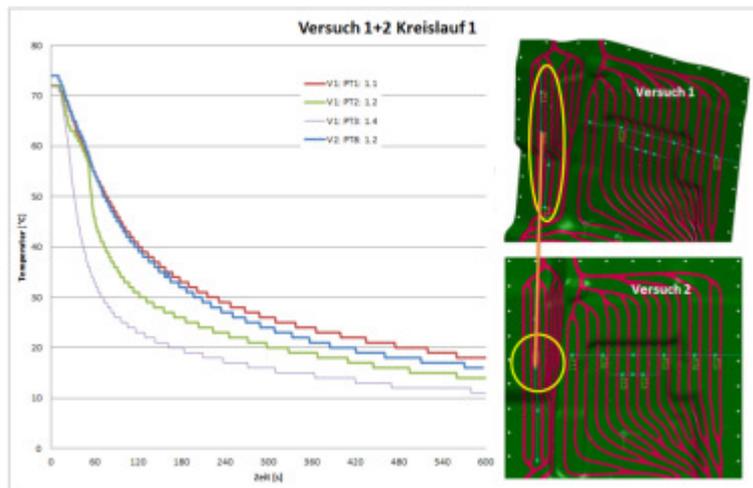


Abbildung 21: Vergleich der Temperaturkurven für FracTherm®-Kanalstruktur 1 in Versuch 1 und 2

Der Verlauf aller Kurven in beiden Versuchen ist ähnlich, auch die Temperaturdifferenz von ca. 20 °C zu gleichen Zeitpunkten bleibt bestehen.

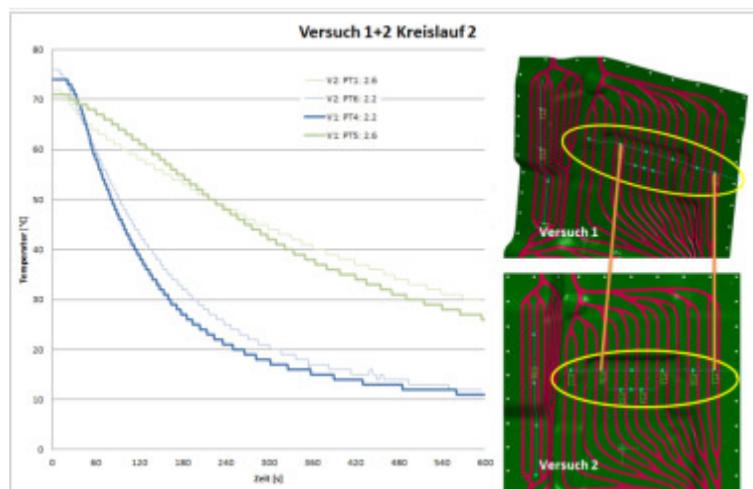


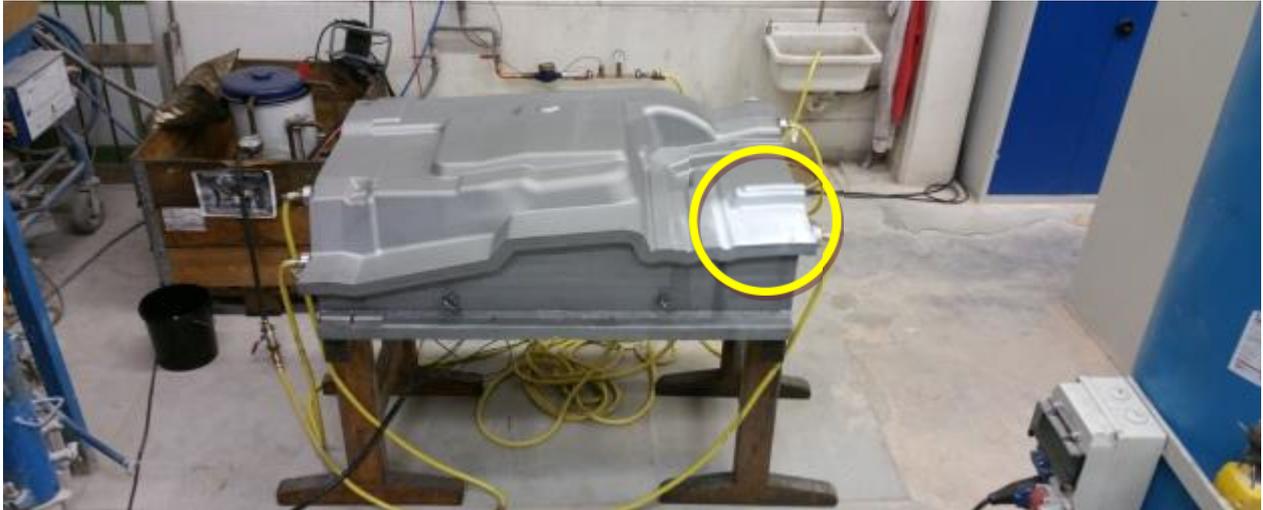
Abbildung 22: Vergleich der Temperaturkurven für FracTherm®-Kanalstruktur 2 in Versuch 1 und 2

Der Verlauf aller Kurven in beiden Versuchen ist ähnlich, auch die Temperaturdifferenz von ca. 20 °C bleibt bestehen. Somit ist sichergestellt, dass die Temperaturfühler ihre Funktion erfüllen, da sie nach Tausch fast identische Messwerte erzeugen.

In der folgenden Versuchsreihe werden neben den Auswertungen über Temperaturfühler auch Thermografieaufnahmen erstellt. Des Weiteren werden die Zu- und Abläufe variiert.

### 3.3.4. Versuchsreihe 2: Auswertung über Temperaturfühler und Thermografieaufnahmen

Zur Untersuchung der Durchströmung des Werkzeugs werden Thermografieaufnahmen in einem Raum der Firma Grunewald angefertigt. Zunächst muss sichergestellt werden, dass die Werkzeugoberfläche geeignet ist, um brauchbare Thermografieaufnahmen herzustellen. Da die unbehandelte Oberfläche im Infrarotspektrum stark reflektiert (hoher Reflexions-, d. h. niedriger Emissionsgrad), muss sie derart verändert werden, dass sie einen hohen Emissions- und damit niedrigen Reflexionsgrad aufweist. Firma Grunewald findet dazu ein geeignetes Spray, mit dem die Oberfläche besprüht werden kann. Abbildung 23 zeigt das aufgebaute Werkzeug mit einer probeweise besprühten Ecke. Thermografieaufnahmen zeigen bezüglich der Reflexion im Infrarotspektrum einen deutlichen Unterschied zwischen der präparierten Ecke und dem restlichen Werkzeug, so dass das gesamte Werkzeug entsprechend beschichtet wird.

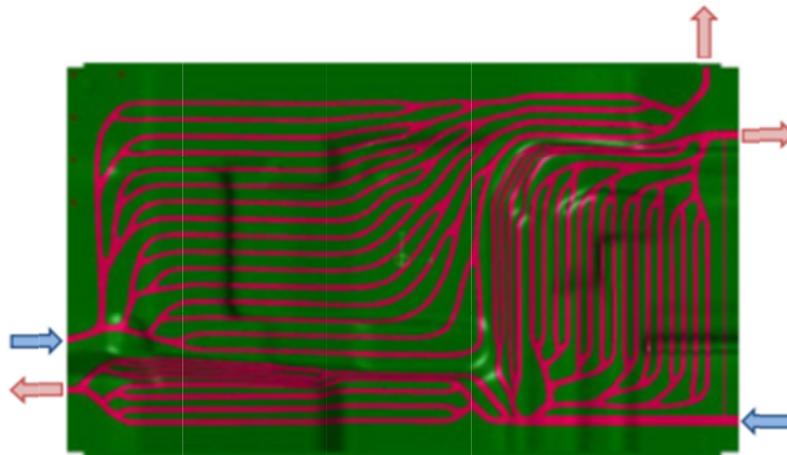


**Abbildung 23: Aufgebautes Werkzeug mit probeweise besprühter Ecke (gelber Kreis) zur Erzeugung eines hohen Emissionsgrades**

Es werden vier Versuche durchgeführt. Dabei wird das Werkzeug zunächst mit warmem Wasser aufgeheizt und anschließend mit kaltem Wasser durchströmt. Der Abkühlvorgang, der ca. 10 Minuten dauert, wird mit der Thermografiekamera festgehalten. Beim 4. Versuch wird ein geringerer Volumenstrom verwendet; der Abkühlvorgang wird daher über eine Dauer von ca. 27 Minuten beobachtet. Die Umgebungstemperatur liegt bei den Versuchen zwischen 18 und 22 °C, die Wassertemperatur beim Aufheizen des Werkzeugs zwischen 82 und 86 °C, die Oberflächentemperatur zwischen 74 und 78 °C und die Kaltwassertemperatur beim Abkühlvorgang zwischen 15 und 20 °C.

Die folgenden Abbildungen zeigen für die vier durchgeführten Versuche jeweils ein Durchströmungsschema mit den zugehörigen Zu- und Ablaufpositionen sowie einige Thermografieaufnahmen. Der Zeitraum zwischen zwei Bildern beträgt ca. 100 Sekunden.

## 1. Versuch



**Abbildung 24: Durchströmungsschema des 1. Versuchs**

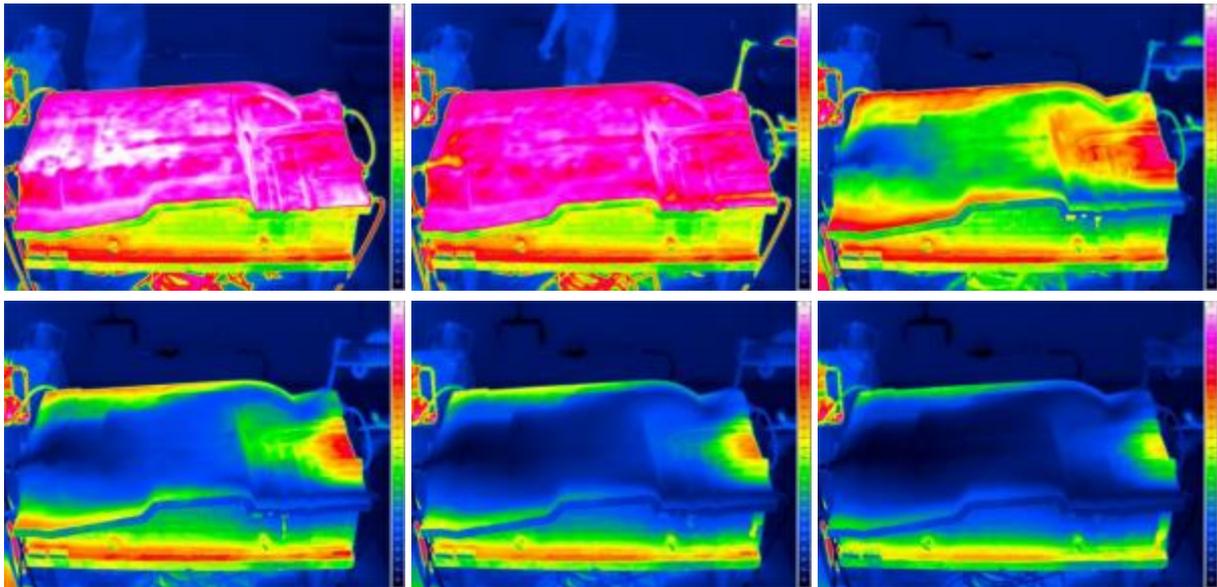


Abbildung 25: Thermografiesequenz des 1. Versuchs

Es wird deutlich, dass zwar insgesamt eine flächige Abkühlung auch an den Flanken erreicht wird, jedoch Bereiche am Rand und in der Mitte rechts nur unzureichend gekühlt werden. Es wird vermutet, dass dies an einem abgeknickten Schlauch liegt. Daher wird der Versuch ohne Abknicken des Schlauchs wiederholt.

## 2. Versuch

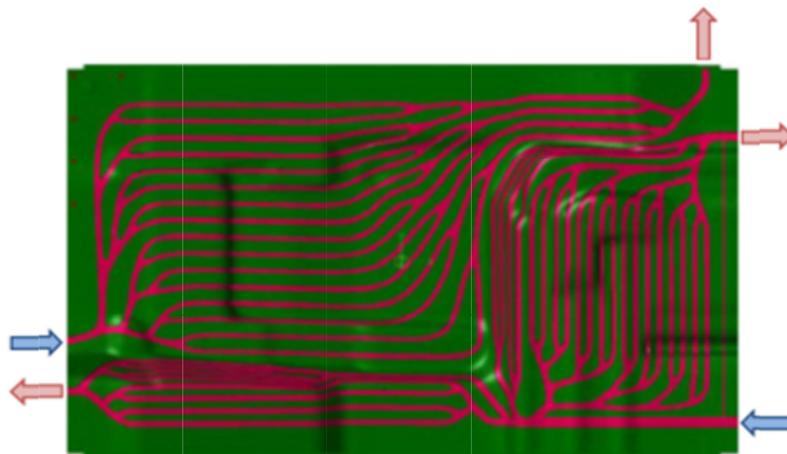


Abbildung 26: Durchströmungsschema des 2. Versuchs (identisch mit 1. Versuch)

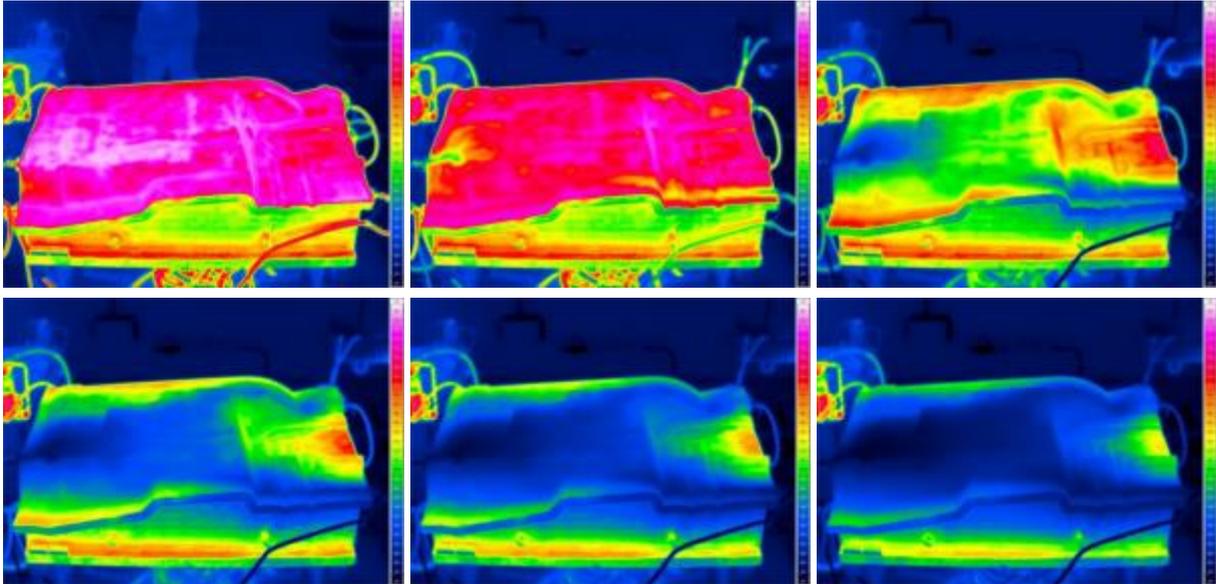


Abbildung 27: Thermografiesequenz des 2. Versuchs

Der 2. Versuch zeigt das gleiche Strömungsverhalten wie der 1. Versuch; somit kommt der abgelenkte Schlauch nicht als Ursache für die partiell unzureichende Kühlung in Frage. Stattdessen ist es vorstellbar, dass der Grund für die schlecht durchströmten Bereiche in einem ungenügenden Hydraulikabgleich – insbesondere aufgrund der nicht berücksichtigten zusätzlichen Druckverluste, die durch die dreidimensionale Struktur entstehen – zu suchen ist. Außerdem können starke Strömungsumlenkungen am Anschluss einer FracTherm®-Struktur an einen Sammelkanal eine Rolle spielen und Bereiche mit günstigeren Winkeln bevorzugen.

Als Nächstes wird daher untersucht, ob sich ein anderes Bild ergibt, wenn die Strömungsrichtung geändert wird. Im 3. Versuch werden somit die Zu- und Ablaufpositionen gegenüber dem 1. und 2. Versuch getauscht.

In der folgenden Abbildung 28 sind die sich ergebenden Abkühlkurven dargestellt, die die Temperaturverläufe der eingebauten Temperaturfühler über der Zeit angeben.

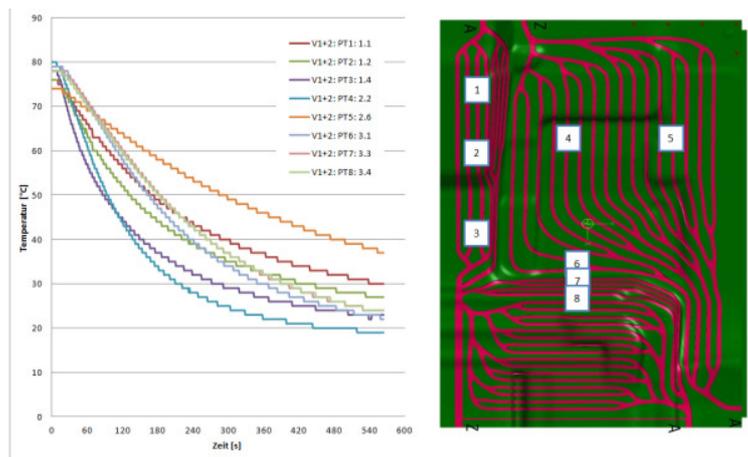


Abbildung 28: Abkühlkurven der Temperaturfühler in Versuch 2

Die Kurven zeigen in den meisten Fällen einen typischen Verlauf. Die mit 5 gekennzeichnete Kurve verläuft relativ flach, was eine langsame Abkühlung bedeutet. Die Ursache ist bereits in Abschnitt 3.3.3 beschrieben.

3. Versuch

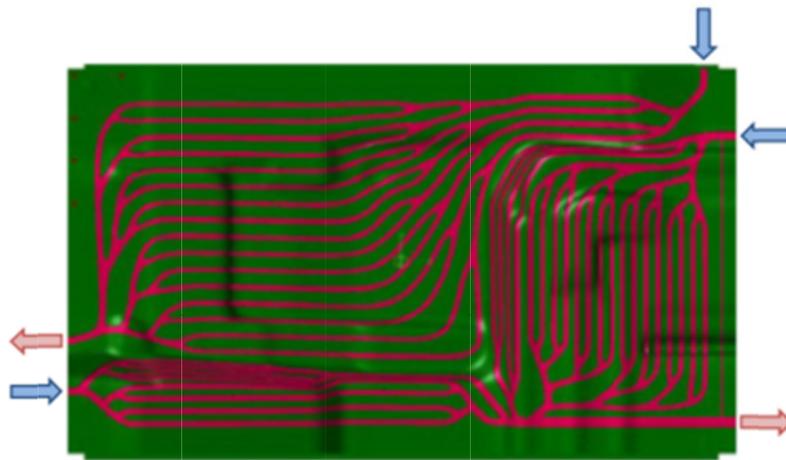


Abbildung 29: Durchströmungsschema des 3. Versuchs (Zu- und Ablaufpositionen gegenüber 1. und 2. Versuch getauscht)

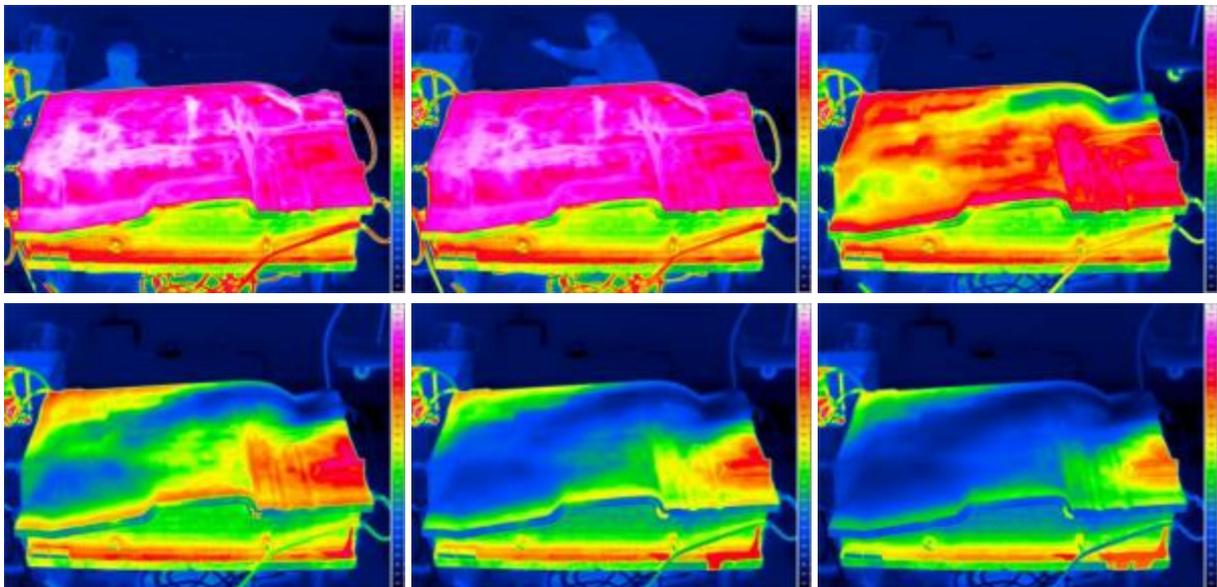


Abbildung 30: Thermografiesequenz des 3. Versuchs

Beim 3. Versuch ergeben sich aufgrund geänderter Zu- und Ablaufpositionen veränderte Thermografiebilder; nunmehr werden die Ecke links oben, der Bereich in der Mitte rechts und die Ecke rechts unten schlechter gekühlt als die übrigen Flächen. Nach wie vor ist vor allem der Bereich in der Mitte rechts kritisch bezüglich einer effizienten Kühlung. Die Ergebnisse lassen sich auch anhand der Messkurven der Temperaturfühler ablesen (s. Abbildung 31 orange (PT 5) und hellgrüne Kurve (PT 8)).

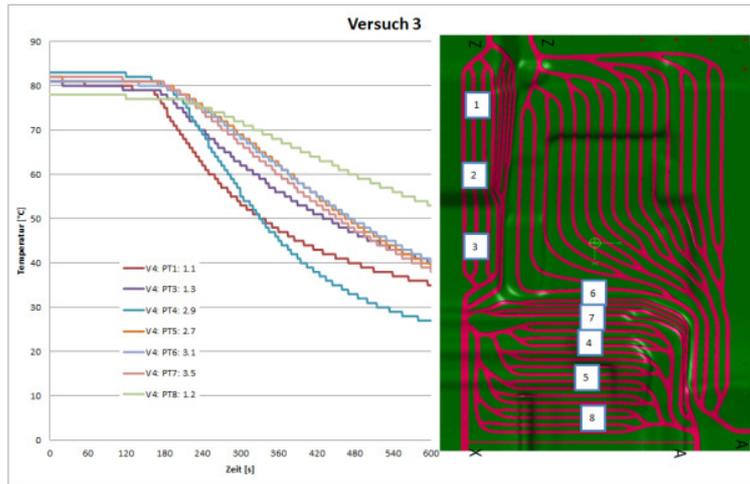


Abbildung 31: Abkühlkurven der Temperaturfühler in Versuch 3

In einem 4. Versuch soll herausgefunden werden, ob der Bereich besser durchströmt wird, wenn der Zulauf rechts oben in einen Ablauf geändert wird und der Ablauf rechts unten verschlossen wird. Außerdem wird der Volumenstrom reduziert.

#### 4. Versuch

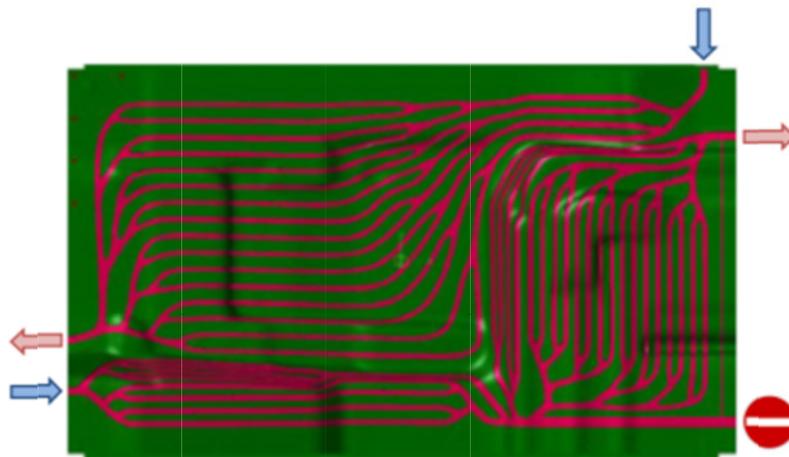


Abbildung 32: Durchströmungsschema des 4. Versuchs (wie 3. Versuch, aber Ablauf rechts unten verschlossen und Zulauf rechts oben in Ablauf geändert)

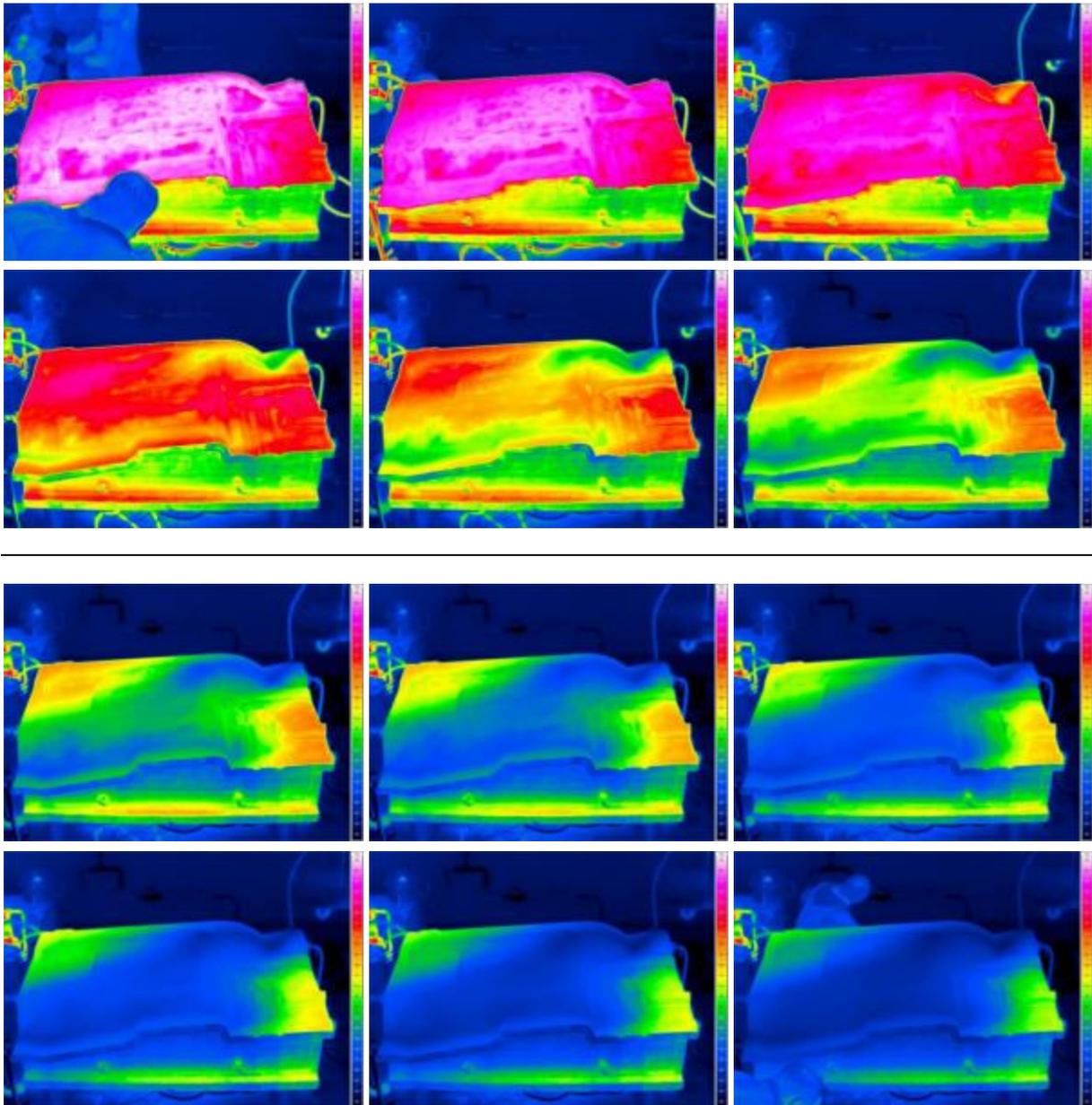


Abbildung 33: Thermografiesequenzen des 4. Versuchs (ca. 40 Sekunden Pause zwischen den Sequenzen)

Die Thermografiebilder des 4. Versuchs sind jenen des 3. Versuchs qualitativ ähnlich; auch in diesem Fall werden die Ecken links oben und rechts unten sowie die Mitte rechts nicht ausreichend gekühlt. Dieses Verhalten ist auch den Abkühlkurven zu entnehmen. Man sieht deutlich, dass in den ersten 180 s kaum eine Abkühlung stattfindet (s. Abbildung 34).

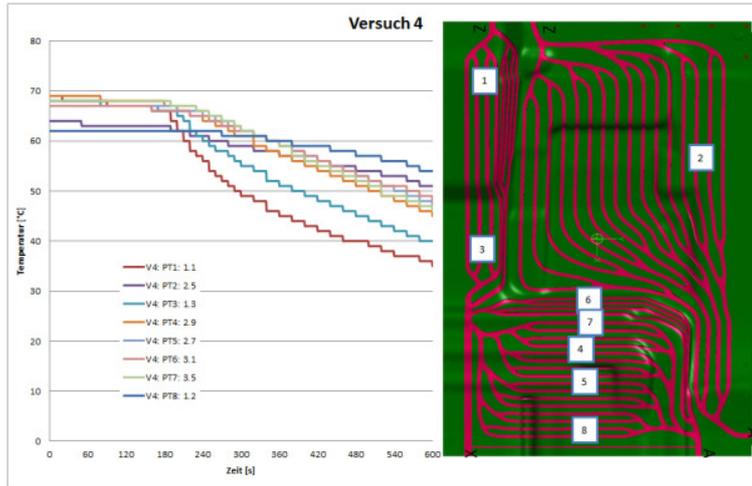


Abbildung 34: Abkühlkurven der Temperaturfühler in Versuch 3

Im folgenden Abschnitt werden die die Versuche flankierenden Simulationen erläutert.

### 3.3.5. Versuche mit dem Demonstrationswerkzeug und begleitende Simulationen

Als Temperaturfühler kommen grundsätzlich in Frage die üblichen Pt100-Sensoren und IR-Sensoren. Beide Sensorarten werden bei Fa. Grunewald seit längerem eingesetzt. IR-Sensoren sind schneller, genauer, aber auch deutlich teurer als Pt100. Für das Demonstrationswerkzeug werden aus Kostengründen Pt100 eingesetzt. Es sei hier vorweggenommen, dass wie zu erwarten die Messungen mit Pt100 zu vergleichbaren Ergebnissen kommen wie die der Thermokamera.

Die Abbildung 35 zeigt, wo die Pt100-Sensoren in das Demonstrationswerkzeug eingesetzt sind.

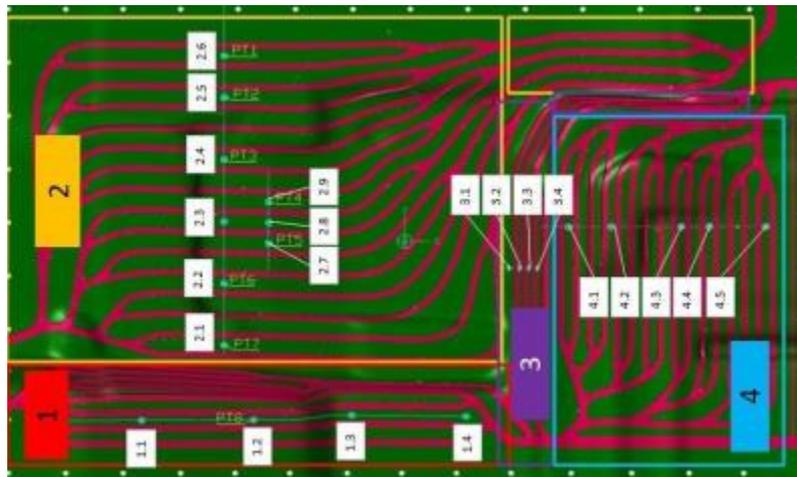


Abbildung 35: Einbauorte der Pt100-Sensoren: Grüne Punkte mit Kennziffer des Sensors, Einbau 5mm unterhalb der Werkzeugoberfläche

Die Einbauorte der Temperaturfühler sind wie folgt begründet und führen zu folgenden Ergebnissen:

- Feld 1: Die Sensoren 1.1 bis 1.4 messen das Temperaturprofil längs der Kühlkanäle. Wie erwartet zeigt sich im Versuch, dass die Abkühlung im hinteren Teil der Kühlung schlechter wird, weil das Kühlwasser erwärmt wird.
- Feld 2: Die Sensoren 2.1 bis 2.6 messen das Profil quer zu den Kühlkanälen. Wie erwartet sind die Temperaturen nahezu gleich. Eine Ausnahme bilden die Temperaturen 2.6 und 2.5. Hier steigt die Temperatur an. Die Simulation zeigt, dass dies auf den breiten Rand des Werkzeugs zurückzuführen ist. Das Problem kann bei einem realen Werkzeug vermieden werden. Die Sensoren 2.7 bis 2.9 haben eine andere Aufgabe. Das Werkzeug ist 20mm dick. Die Bohrungen für die Sensoren gehen bis auf 5mm (2.7), 10mm (2.8) und 15mm (2.9) an die Werkzeugoberfläche heran. Mit den Sensoren 2.7 bis 2.9 soll die mittlere Temperatur in der

Schwerschicht berechnet werden können. Im Versuch hat sich allerdings gezeigt, dass die eingesetzten Pt100-Sensoren sehr träge sind und für eine Berechnung nicht geeignet sind. Deshalb beschränkt sich die Untersuchung auf die Simulation.

- Feld 3: Dieses Feld ist eine kritische Zone, weil das Werkzeug hier einen starken Anstieg hat. Hier bilden sich bisher Wärmenester, die die Abkühldauer des Werkzeugs bestimmen. Gerade in dieser sehr stark gekrümmten Kontur muss die Schwerschicht sicher auf 40°C abgekühlt werden, weil sonst der Teppich nach Entnahme aus dem Kühlwerkzeug seine Form nicht hält. Die Sensoren sind quer zu den Kühlkanälen angeordnet, um die Temperatur über den ganzen Anstieg messen zu können. Hier zeigt sich, dass die gewählte Kühlung ein Wärmenest in dieser Zone verhindert. Das bestätigen sowohl die Sensoren als auch die Bilder der Thermokamera.
- Feld 4: Die Sensoren sind quer zu den Kanälen angeordnet. Die Kanäle zu den Messorten 4.1 und 4.2 liegen in einer unkritischen Ebene der Form. Die Kanäle zu 4.3 bis 4.5 folgen etwa in der Mitte der Zone einer u-förmigen Kontur, die beim Versuch nach oben zeigt. Die Temperaturen zu 4.1. und 4.2 verhalten sich wie erwartet. Die Kanäle zu 4.3 bis 4.5 zeigen eine sehr viel schwächere Abkühlung. Grund ist der deutlich reduzierte bis gar nicht vorhandene Durchfluss von Kühlwasser. In solch einer u-förmigen Kontur kann sich Luft am höchsten Punkt sammeln und festsetzen. Das verhindert den Durchfluss von Kühlwasser nahezu komplett. Die Folge ist, dass die Wärme aus diesem Teil der Zone über die Kanäle zu 4.1 und 4.2 abgeführt werden muss, was die Kühlzeit deutlich verlängert. Daraus ist zu lernen, dass das Kühlwerkzeug anders konstruiert werden muss, d.h. die Unterseite des Kühlwerkzeugs muss deutlich geglättet werden. Auch ohne Luft im Kanal wird der Strömungswiderstand in diesen Kanälen deutlich höher liegen als in den ebenen Kanälen und somit die Durchflussmenge an Kühlwasser dort deutlich geringer sein. Das führt zur nahezu gleichen schlechten Kühlung. Das Ergebnis wird durch die Simulation bestätigt.

Das Abkühlverhalten wird für den genaueren Vergleich zwischen der Kühlung mit Rohren und mit der hier untersuchten FracTherm®-Kanalstruktur mit einer FEM-Software analysiert (siehe Abschnitt 3.3.6). Um darüber hinaus einige grundlegende Trendaussagen zu erhalten, wird ein vereinfachtes Modell verwendet. Abbildung 36 zeigt die Struktur mit den parallel ausgerichteten Kanalelementen 1-4 und 5-8. Die Kanalelemente können beliebig miteinander verschaltet werden. Alle Kennwerte sind einfach änderbar.

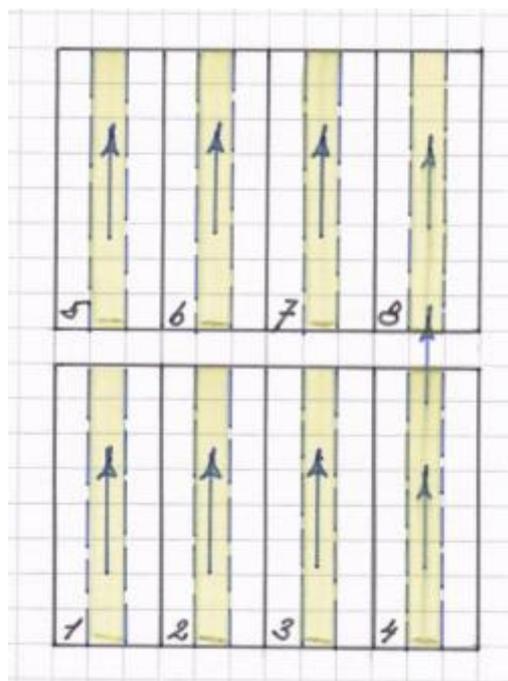


Abbildung 36: Kanalsegmente im vereinfachten Simulationsmodell

Ein wichtiger Engpass der hier im Werkzeug eingesetzten Kanalstruktur ist, dass die Abkühlung längs der Kanalstruktur schlechter wird, weil das Kühlwasser zum Ausgang hin immer weiter erwärmt wird. Die Simulation weist auf 2 Lösungsmöglichkeiten hin.

Verringerung des Kanalabstands zum Ende der Struktur hin (Simulation)

In Abbildung 36 werden die Kanalsegmente wie im Bild parallel geschaltet. Das Kühlwasser tritt mit 6°C in die Kanäle 1 bis 4 ein. Die Kanäle 5 bis 8 sind den Kanälen 1 bis 4 nachgeschaltet, also z.B. 5 folgt auf 1. Der FracTherm®-Algorithmus legt den Abstand der Kanäle für das ganze Feld fest, ausgehend davon, wieviel Wärme aus dem Werkzeug entnommen werden soll. In dieser Simulation wird der Abstand der Kanäle 5 bis 8 gegenüber dem Abstand der Kanäle 1 bis 4 verringert, um das Abkühlverhalten insgesamt anzugleichen.

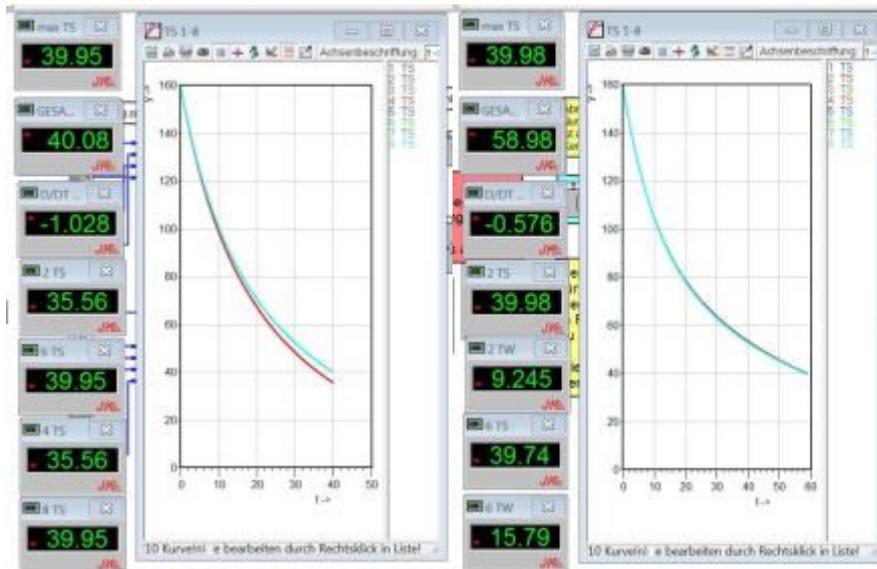


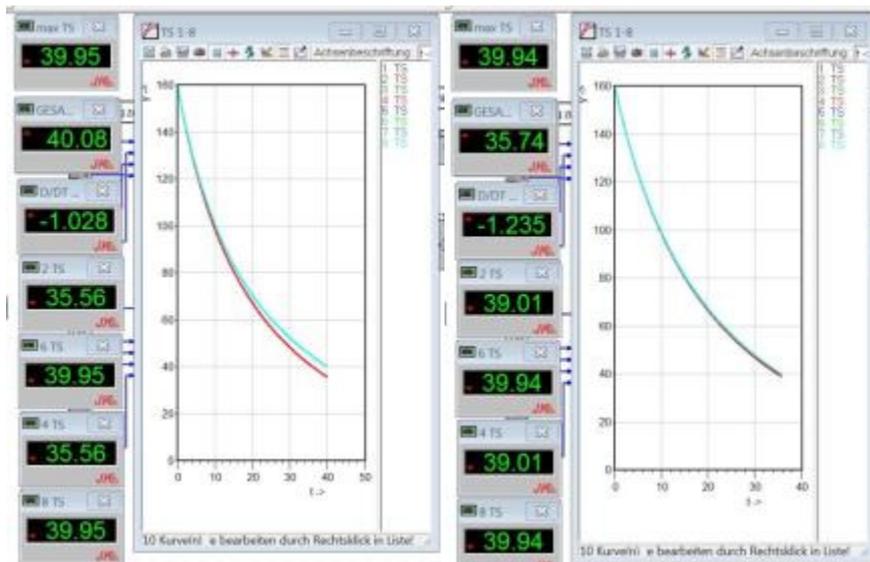
Abbildung 37: Verringerung des Kanalabstandes der Kanäle 5 bis 8 gegenüber 1 bis 4

In der Abbildung 37 links sind die Kanalabstände für die Kanäle 1 bis 4 so groß wie für 5 bis 8. Die Folge ist, dass die Schwertschicht, die von den Kanälen 5 bis 8 gekühlt wird, deutlich langsamer abkühlt. Wenn im hinteren Feld die Temperatur der Schwertschicht im Segment 6 die Grenze von 40°C erreicht (hier 6TS = 39,98°C), ist die Schwertschicht im vorderen Feld bereits auf 2TS = 33,48°C abgekühlt. Die Temperatur der Schwertschicht in den Segmenten 5 bis 8 (blau) liegt deutlich über der Temperatur in den Segmenten 1 bis 4 (rot).

In der Abbildung 37 rechts wird der Abstand der Kanäle 5 bis 8 auf 72% des Abstandes der Kanäle 1 bis 4 verringert. Die Abkühlung in den Segmenten 1 bis 4 ist nahezu deckungsgleich zur Abkühlung in den Segmenten 5 bis 8. Die Abkühlung ist also sowohl quer zur Kanalstruktur als auch längs der Kanalstruktur nahezu gleich. Gleichzeitig verkürzt sich die Abkühlzeit von 69,35s (links) auf 58,98s (rechts).

Einsatz von Nanofluids (Simulation)

Aus der Literaturrecherche konnte zudem extrahiert werden, dass Nanopartikel eine interessante Wirkung auf die Wärmekapazität einer Flüssigkeit haben. Nanofluids erhöhen die Wärmekapazität der Kühlflüssigkeit. Die Ergebnisse zeigt die Abbildung 38.



**Abbildung 38: Einsatz von Nanofluids : Links ohne Nanofluids, rechts mit Nanofluids**

Für die Anordnung der Kanäle gilt wiederum das Prinzip aus Abbildung 36. Im linken Diagramm wird als Kühlmittel wie üblich Wasser eingesetzt. Die Kühlzeit beträgt 40,08s und wird von den Segmenten 5 bis 8 bestimmt. Die Abkühlkurven für die Segmente 1 bis 4 (rot) weichen sichtbar von den Abkühlkurven der Segmente 5 bis 8 ab. (Hinweis: Das Ergebnis ist nicht direkt vergleichbar mit dem Ergebnis in Abbildung 37/links, weil aus Darstellungsgründen der Abstand der Kanäle anders gewählt ist). Im Diagramm rechts werden dem Kühlwasser Nanofluids hinzugefügt. Die Wärmekapazität des Wassers wurde um den Faktor 5 erhöht. Er ist zu erwarten, dass damit die Kühlzeit verringert wird, tatsächlich von 40,08s (links) auf 35,74s (rechts). Mindestens genauso wichtig ist aber das Ergebnis, dass die Nanofluids dafür sorgen, dass die Abkühlkurven der Segmente 1 bis 4 am Kühlwassereinlass nahezu zusammenfallen mit den Abkühlkurven der Segmente 5 bis 8 am Kühlwasserauslass. Die Nanofluids können für eine gleichmäßige Abkühlung längs der Kühlkanäle sorgen, ohne den Abstand der Kühlkanäle zu ändern.

Ein besonderer Engpass ist die nicht messbare mittlere Temperatur der Schwertschicht. Fällt die mittlere Temperatur auf 40°C, kann der Kühlvorgang abgeschlossen werden. Der abgekühlte Teppich behält seine Form. Allerdings kann die Temperatur nicht direkt gemessen werden. Deshalb wird die nötige Kühldauer mit Versuchen ermittelt. Nachteil ist nicht nur der damit erzeugte Abfall, sondern auch, dass Änderungen der Umgebungstemperatur des Formwerkzeugs nicht berücksichtigt werden können. Der erste Ansatz, mit einer Bohrung bis zur Oberfläche des Formwerkzeugs einem IR-Sensor die Möglichkeit zu geben, die Schwertschichttemperatur an der Unterseite direkt zu messen, wird verworfen. Der horizontale Wärmefluss in der Schwertschicht ist vernachlässigbar gegenüber dem vertikalen Wärmefluss direkt von der Schwertschicht in das Aluminiumwerkzeug. Eine Bohrung bis zur Schwertschicht bewirkt, dass die Schwertschicht genau dort sehr schlecht gekühlt wird. Ein IR-Sensor kann deshalb nur eine deutlich zu hohe Temperatur messen.

Die Temperatur in der Schwertschicht soll mit Hilfe des Wärmestroms bestimmt werden, der aus der Schwertschicht in das Werkzeug eintritt und dort in unterschiedlicher Nähe zur Oberfläche des Werkzeugs für eine Temperaturdifferenz sorgt. In der Simulation wird deshalb die Temperatur im Werkzeug 5mm und 10mm unterhalb der Oberfläche verwendet.

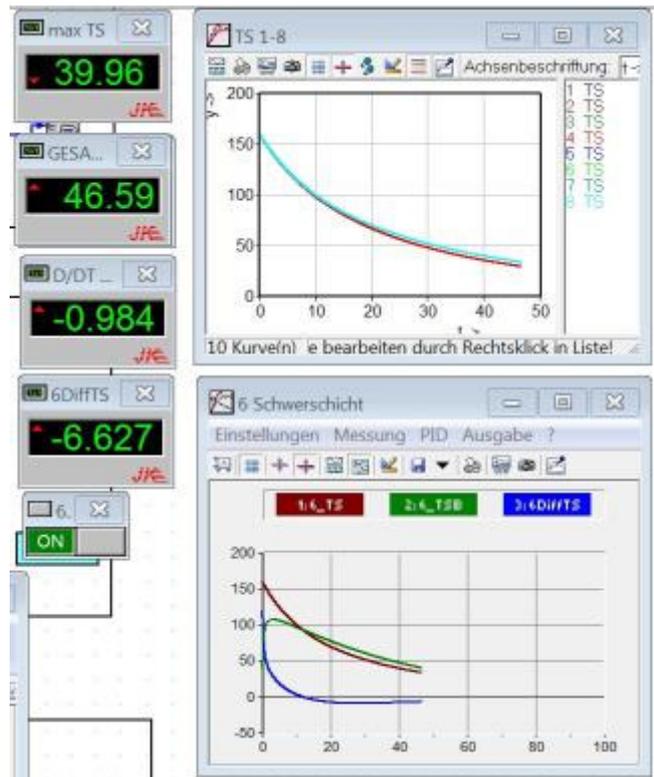
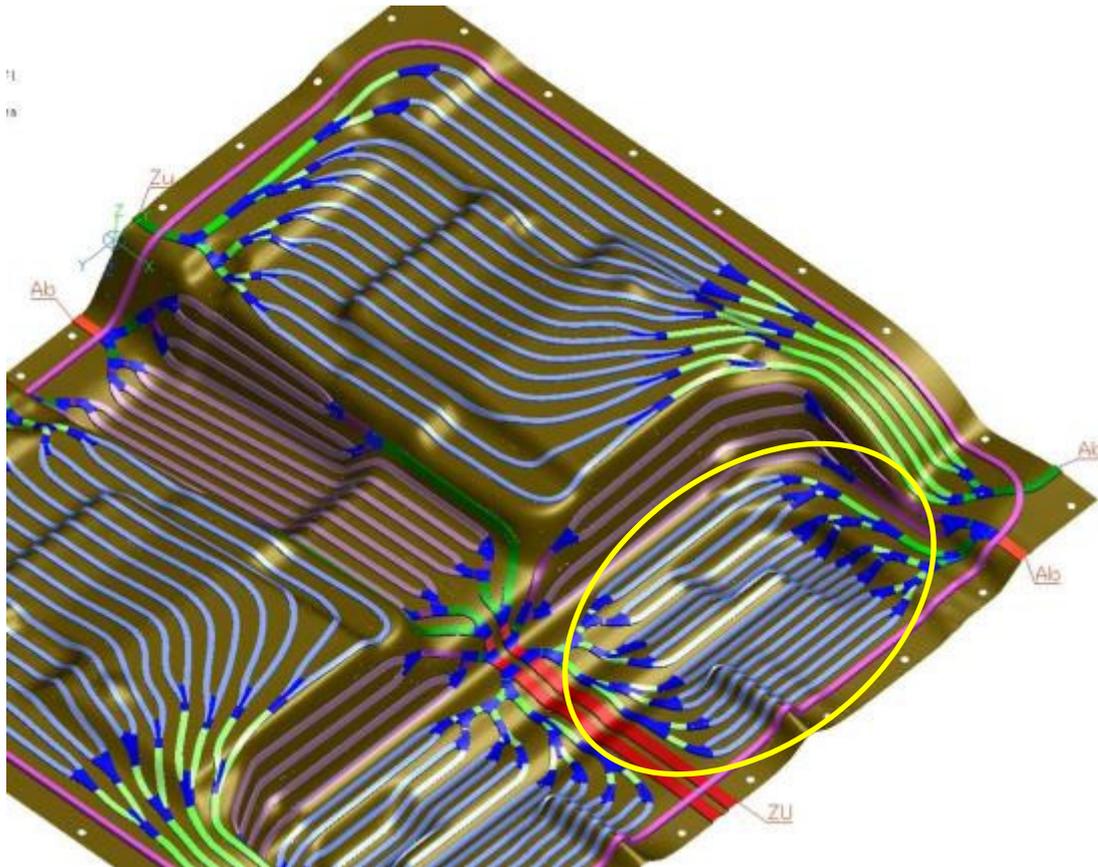


Abbildung 39: Abschalten des Kühlvorgangs mit berechneter mittlerer Temperatur der Schwerschicht

Der rote Temperaturverlauf zeigt die in der Simulation bestimmte mittlere Temperatur der Schwerschicht. Der grüne Verlauf zeigt die Temperatur, die aus den angenommenen Sensoren berechnet wird. Die mit den Sensoren bestimmte Temperatur liegt über der "tatsächlichen" Temperatur der Schwerschicht und führt zu einer ungewollten Verlängerung der Kühlzeit von 40,08 s (roter Verlauf) auf 46,5 s (grüner Verlauf). Eine Berechnung einer angenäherten Schwerschichttemperatur erscheint grundsätzlich machbar. Die vorliegenden Ergebnisse genügen den Anforderungen der Praxis aber noch nicht.

### 3.3.6. Finite-Elemente-Simulation des Demonstrations-Werkzeugs

Mithilfe der aus der Gießerei-Branche stammenden für die Anwendung im vorliegenden Projekt geeigneten Software WinCast® von der Firma RWP GmbH sind im Hause Grunewald Finite-Elemente-Simulationen einer aus dem Demonstrations-Werkzeug entnommenen FracTherm®-Kanalstruktur durchgeführt worden (s. Abbildung 40).



**Abbildung 40: Die für die Simulation genutzte Werkzeugfläche (gelb eingekreist)**

Als Vergleich diente dieselbe Werkzeugfläche, in der eine konventionelle Kanalstruktur, die dem Stand der Technik entspricht, angenommen wurde. Diese entspricht Edelstahl-Rohren mit einem Durchmesser von Innendurchmesser von 20 mm und einer Wandstärke von 1,5 mm, die in der Aluminium-Form eingegossen sind. In Abbildung 41 sind beide Flächen während der Simulation dargestellt.

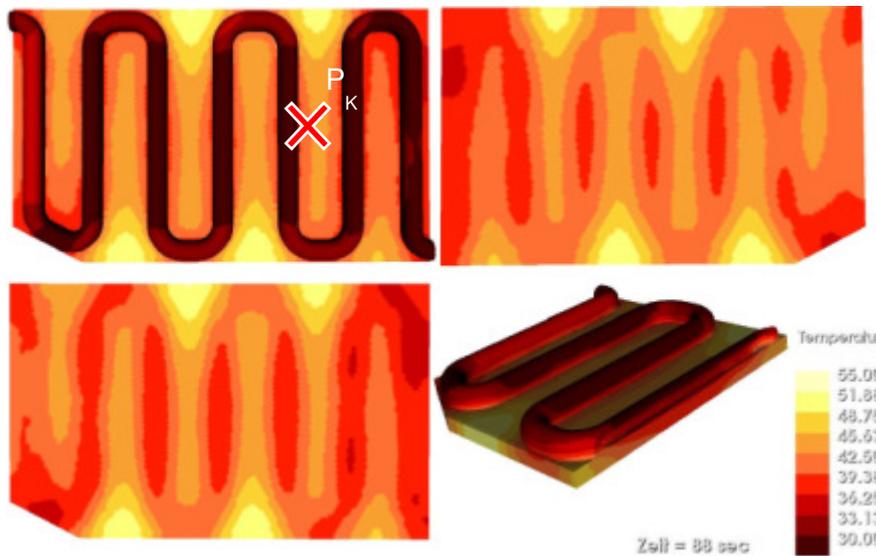


**Abbildung 41: Darstellung der Werkzeugflächen in der Finite-Elemente-Software (links konventionelle Kanalstruktur, rechts FracTherm®-Kanalstruktur)**

Dabei ist die auf 180°C aufgeheizte Werkzeugoberfläche mittels des durchströmenden 7°C kalten Wassers abgekühlt worden. Der Volumenstrom entspricht mit 1.650 l/h dem typischerweise von Kunden der Firma Grunewald eingesetzten Volumenstrom. Das Werkzeugmaterial entspricht in beiden Fällen der Aluminium-Legierung AlSi9Cu3, die auch aktuell als Werkstoff für alle gießtechnisch bei Grunewald hergestellten Werkzeuge verwendet wird. Die eingesetzten Rohre für den konventionellen Fall sind mit V2A (Edelstahl) angenommen.

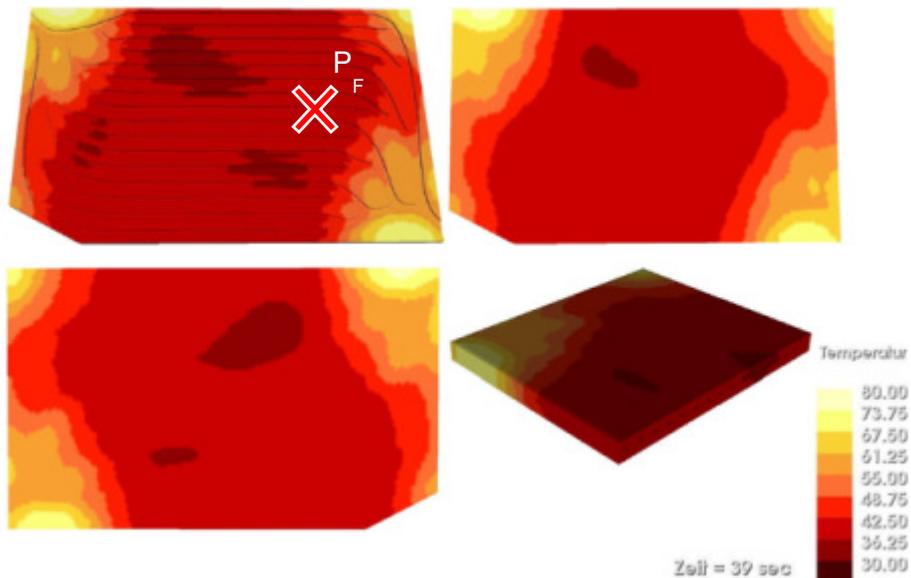
Die Zieltemperatur für ein beispielhaftes umzuformendes Material beträgt 40°C. Wenn das Bauteil in allen Bereichen eine Temperatur von unterhalb 40°C erreicht hat, behält es die durch die Umformung erzeugte Form und kann dem Werkzeug entnommen werden.

In Abbildung 42 sind exemplarisch einige Bilder aus dem Ablauf der Simulation mit dem konventionellen Kanalsystem dargestellt. Mit  $P_K$  ist der besonders betrachtete Punkt bezeichnet, der in Diagramm in Abbildung 44 mit seiner Abkühlkurve dargestellt ist.



**Abbildung 42: Abkühlung mit Hilfe der konventionellen Kanalstruktur**

Abbildung 43 zeigt Ausschnitte aus dem Ablauf der Simulation mit der FracTherm®-Kanalstruktur. Mit  $P_F$  ist der besonders betrachtete Punkt bezeichnet, der in Diagramm in Abbildung 44 mit seiner Abkühlkurve dargestellt ist



**Abbildung 43: Abkühlung mit Hilfe der FracTherm®-Kanalstruktur**

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen eine wesentliche Verbesserung der Kühlwirkung mittels der FracTherm®-Kanalstruktur verglichen mit der heute eingesetzten konventionellen Kühlung.

## Abkühlkurve eines Punktes auf der Werkzeugoberfläche

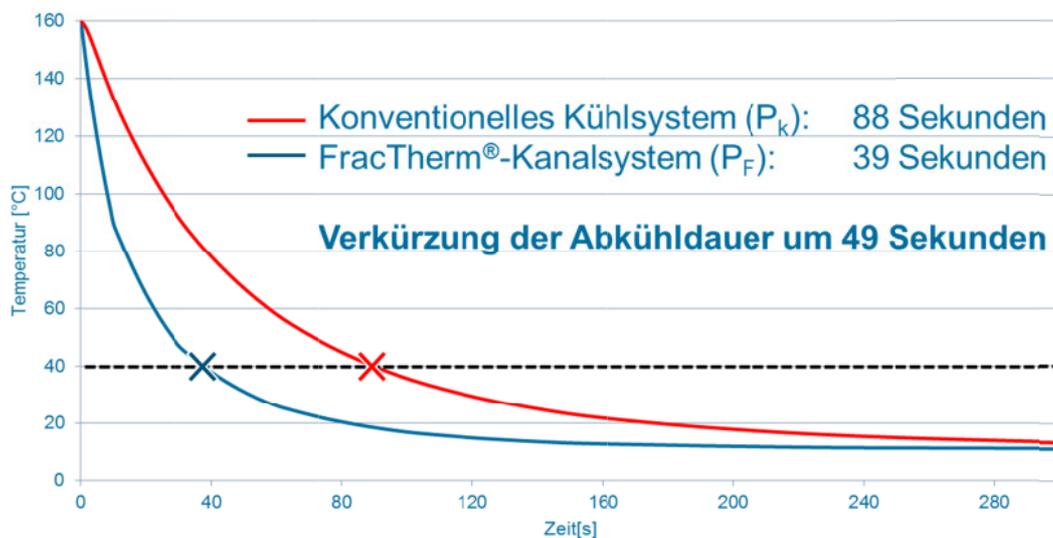


Abbildung 44: Ergebnis der Abkühldauer von 180°C auf 40°C

Wie in Abbildung 44 zu erkennen ist, wird die Zieltemperatur des Punktes  $P_F$  an der Werkzeugoberfläche mit der FracTherm®-Kanalstruktur innerhalb von 39 s erreicht. Bei Einsatz der konventionellen Kühlung dauert der Vorgang bei Punkt  $P_k$  88 s, was mehr als der doppelten Zeit für die Erreichung der Zieltemperatur entspricht.

Dieses Ergebnis zeigt das Potential der FracTherm®-Kanalstruktur: im Vergleich zur konventionellen Kühlung kann eine Kühlzeit von weniger als 50% der vorher benötigten Zeit erreicht werden, trotz der im folgenden aufgeführten Einschränkung, die sich u.a. durch die konstruktive „Verbiegung“ der FracTherm®-Kanalstruktur von der Fläche auf die Werkzeugoberfläche ergibt. Dies sind Druckverluste in der FracTherm®-Kanalstruktur durch die in der zweidimensionalen Fläche optimierten und auf die Werkzeugfläche verbogene FracTherm®-Kanalstruktur.

### 3.3.7. Ergebnisse aus konstruktiver und fertigungstechnischer Betrachtungsweise

Bei der CAD-Konstruktion und der Fertigung des Demonstrationswerkzeuges werden ebenfalls wichtige Ergebnisse erzielt. Diese werden im Folgenden aufgeführt:

- CAD-Konstruktion:
  - Die Rückseite der Konturschale wird nicht genug vereinfacht. Dies führt zu hohen konstruktiven Aufwänden bei der Erstellung der dreidimensionalen FracTherm®-Strukturen, da sehr vielen Konturverläufen mit den Kanälen gefolgt wird. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium ist es sinnvoller, die Rückseite der Konturschale mit relativ geringem konstruktivem Aufwand deutlich zu vereinfachen, und somit auch die Kanalerstellung zu optimieren.
  - Die Umsetzung der FracTherm®-Kanalstrukturen aus der zweidimensionalen Ebene in einen dreidimensionalen Volumenkörper stellt sich als sehr aufwändig heraus. Von der Komplexität der Kontur hängt in besonderem Maße die Komplexität der zu konstruierenden Kanalstrukturen ab; diese Aufgabe lässt sich mit den bei Firma Grunewald eingesetzten CAD-Systemen nicht automatisieren (die Vereinfachung der Schalenrückseite, s. o., ist ein erster Schritt zur Vereinfachung). Es ist wünschenswert, ein der Kontur folgendes dreidimensionales Kanalsystem als Volumenkörper aus FracTherm® zu erhalten, welches direkt verlustfrei in die Konstruktion übernommen werden kann.
  - Die einzelnen Kanalsysteme werden manuell zu gemeinsamen Ein- und Auslässen verbunden. Dabei zeigt sich die Unerfahrenheit der Konstrukteure mit strömungstechnisch optimierten Strukturen; die ergänzten Kanäle werden mit teilweise scharfen Biegungen ausgeführt und bilden somit einen hohen Strömungswiderstand und verursachen hohe Druckverluste.
- Fertigung:

- Bei der gießtechnischen Herstellung sind Lunker und Porositäten durch falsch gesetzte Speiser entstanden. Da die Konturschale eine nahezu homogene Dicke aufweist, ist das Setzen von Speisern kontraproduktiv.
- Diese durch die Lunker und Porositäten entstandenen Undichtigkeiten können durch geeignete Dichtmittel geschlossen werden. Das Werkzeug ist nach Anwendung dieser Mittel in verschiedenen Ausführungen dicht; es existiert somit eine Lösung für Probleme durch Undichtigkeiten.
- Die eingefrästen Dichtnuten an den Werkzeugrändern erfüllen ihre Funktion; es tritt kein Wasser an den Werkzeugrändern aus.
- Die Bohrungen für die Temperaturfühler führen zu Undichtigkeiten, wenn Wasserdruck auf das Kanalsystem gegeben wird (die genau aufeinander angepassten, jedoch nur an den Rändern verschraubten Werkzeugschalen trennen sich durch den Wasserdruck in der Werkzeugmitte voneinander). Durch Verschraubung der einzelnen Werkzeugschalen in der Werkzeugmitte zwischen den Kanälen kann dies verhindert werden.
- Die Versuche legen die Vermutung nahe, dass das Wasser nicht nur in den Kanälen strömt, sondern auch über die flächigen Bereiche von Kanal zu Kanal fließt. Dies könnte durch den Einsatz von geeigneten Dichtmitteln, bspw. Silikonen, zwischen den Kanälen verhindert werden, was jedoch vermutlich sehr aufwändig ist. Außerdem könnten zusätzliche Verbindungen zwischen den Schalen eingebaut werden (s. vorheriger Punkt), so dass die Querströmungen minimiert werden können, wenn die aufeinander angepassten Werkzeugschalen besser verbunden wären und auch dem erhöhten Wasserdruck standhalten können.
- Die Gestaltung der Wasser-Zu- und -abläufe ist technisch lösbar.

### 3.4. Diskussion der Ergebnisse

Das Ziel der begleitenden Literaturrecherche ist es, möglichst viel über natürliche Kühlsysteme in der Natur zu erfahren, mit besonderem Fokus auf die Verbindung verschieden gekühlter bzw. durchströmter Strukturen. Die Verbindung zwischen diesen thermischen Fenstern soll dazu dienen, mögliche Prinzipien für die Ausgestaltung der Kühlung verschiedener Wärmenester abzuleiten.

Die Natur bietet eine Fülle verschiedener Kühlsysteme an, die aber dennoch gut in technische bekannte Kategorien eingeordnet werden können. So wird insbesondere das auch in der Technik bekannte Gegenstromprinzip in vielfältiger Weise eingesetzt, um bestimmte Körperbereiche zu kühlen oder zu wärmen oder sich an bestimmte Umweltbedingungen effizient anzupassen. Für die Kühlung von Formwerkzeugen wie im vorgestellten Projekt, erscheint ein Gegenstromprinzip nicht geeignet, um die Effizienz zu erhöhen. Weitere Kanäle wären hierzu notwendig und eine völlig andere Geometrie müsste gewählt werden. Im vorgestellten Projekt erscheint die Anpassung der bereits gewählten FracTherm®-Geometrie daher nicht sinnvoll.

Besonderes Augenmerk wird dagegen bei der Recherche auf die Verbindung verschiedener Bereiche innerhalb eines Kühlsystems gelegt. Dies erscheint im Hinblick auf die umgesetzte Kanalgeometrie mit FracTherm® zielführend, da bei der Umsetzung einer 2-D-Struktur in eine quasi 3-D-Geometrie verschiedene Flächen miteinander verbunden werden. Diese Flächen können als einzelne thermische Fenster interpretiert werden, die nun möglichst effizient miteinander verbunden werden müssen. Bei vielen Tieren werden solche thermischen Fenster durch das Blutkreislaufsystem verbunden. Abhängig von den Erfordernissen können diese Bereiche über Anastomosen nun genutzt werden und damit von Blut durchflossen werden, oder aber die Anastomosen werden geschlossen und der Teilbereich wird nur vermindert von Blut durchflossen [10]. Mit diesem System können verschiedene Arten ihre spezifische Körpertemperatur regulieren. Je nach Umgebungstemperatur und Stoffwechselaktivität kann Energie abgegeben werden oder die Abgabe deutlich reduziert werden.

Für die Fragestellung im vorliegenden Projekt erscheint dies ein interessanter Ansatz, da es bei den Formwerkzeugen durch die Oberflächenform ebenfalls zur Ausbildung von Wärmenestern kommt. An diesen Stellen muss also besonders zielgerichtet gekühlt werden, um die Taktzeiten noch verkürzen zu können. Eine Kühlung im natürlichen Vorbild kann durch das Öffnen oder Schließen der

Anastomosen situationsgerecht durchgeführt werden. Diese ständige Anpassung ist im technischen System nicht erforderlich. Es kommt also eher darauf an, die Verbindungsstelle an sich zu optimieren, um aufgrund der Struktur der Verbindung eine besonders gute Kühlung solcher Wärmenester zu erreichen, damit die Gesamtkühlung möglichst gleichmäßig und effizient stattfindet. Leider konnten zu der genauen Anatomie solcher Anastomosen keine verwertbaren Literaturquellen gefunden werden. Auch ist fraglich, ob die Übertragung von sich dynamisch anpassenden Arterien und Venen auf eine technisch nicht flexibel gewollte Verbindung sinnvoll erscheint. Eine Anpassung der Fragestellung erscheint hier zunächst sinnvoll.

Über die Literaturrecherche zu natürlichen Vorbildern im Bereich der Kühlung hinaus, werden Literaturquellen zu sogenannten Nanofluids gesichtet. Dabei werden die thermischen Eigenschaften von Flüssigkeiten durch den Zusatz von Nanopartikeln deutlich geändert, insbesondere die Wärmekapazität wird vergrößert. Trotz vieler experimenteller und theoretischer Studien ist es noch immer unklar, ob es sich bei der verbesserten Wärmeleitfähigkeit von Nanofluids um ein anomales Verhalten handelt oder ob dieses Verhalten noch im Bereich der Berechnungsmöglichkeiten der „effective medium theory“ liegt [29].

Insgesamt erscheint dies ein interessanter Ansatz, um die Wärmekapazität deutlich über das bisherige Medium Wasser hinaus zu steigern. Zudem wird damit möglicherweise die Wärmeleitaufnahme entlang der Kanäle deutlich gleichmäßiger als bisher. Allerdings müssen vor einer Einschätzung des Gesamtnutzens noch Umweltaspekte, Mehrkosten und technische Gegebenheiten, wie geschlossene Kreislaufsysteme, ausführlich geprüft werden.

Die vier Versuche zur Durchströmung zeigen prinzipiell ein hohes Potenzial für eine gute, gleichmäßige Kühlung auch in kritischen Bereichen wie z. B. Flanken. Allerdings gibt es Bereiche, die offenbar systematisch nicht gut durchströmt werden. Es sind unterschiedliche Ursachen denkbar, beispielsweise ein unzureichender hydraulischer Abgleich innerhalb der FracTherm®-Strukturen bzw. zwischen den einzelnen FracTherm®-Strukturen, die über Sammelkanäle miteinander verbunden sind. Dabei ist zu bedenken, dass die dreidimensionale Kanalführung zu zusätzlichen Druckverlusten führt, die bei dem einfachen Hydraulikabgleich, der in FracTherm® vorgenommen wird, nicht berücksichtigt werden. Als weitere Ursache kommen Querströmungen durch Spalte zwischen Ober- und Unterteil des Werkzeugs in Betracht, die sowohl zwischen Kanälen innerhalb einer FracTherm®-Struktur als auch zwischen verschiedenen FracTherm®-Strukturen zu hydraulischen Kurzschlüssen führen können. Eine Bilanzierung der Volumenströme an den Zu- und Abläufen zeigt, dass offenbar solche Kurzschlüsse im Werkzeug existieren. Um die Ursachen weiter zu erforschen, sind verschiedene Möglichkeiten vorstellbar, z. B. die Erstellung eines transparenten Modells (ggf. durch 3D-Druck hergestellt), an dem die Durchströmung beispielsweise anhand gefärbter Fluide nachvollzogen werden kann. Auch an dem existierenden Werkzeug könnte an einem einzelnen Zulauf ein gefärbtes Fluid eingebracht und überprüft werden, ob dieses nur an den vorgesehenen Abläufen austritt oder auch an jenen, die nur durch einen Kurzschluss erreichbar sind. Außerdem könnten die beiden Hydraulikkreise (in der Schemazeichnung oben bzw. unten) getrennt voneinander untersucht werden (der jeweils andere Kreis sollte dabei verschlossen werden). Damit wäre ausgeschlossen, dass Wasser von einem Hydraulikkreis in den anderen tritt und zum „falschen“ Ablauf fließt.

Eine gleichmäßige Abkühlung quer zur Kanalstruktur und auch längs der Kanäle ist möglich.

Die Kanalstruktur vermeidet die bisher üblichen Wärmenester in stark gekrümmten Gebieten der Werkzeugoberfläche.

Die Finite-Elemente-Analyse der Firma Grunewald weist nach, dass die Abkühlzeit mit Hilfe der Kanalstruktur gegenüber dem Einsatz der konventionellen Rohrkühlung deutlich verkürzt werden kann.

Die mittlere Temperatur der Schwerschicht kann nicht direkt gemessen werden. Sie kann jedoch grundsätzlich aus der gemessenen Temperaturdifferenz im Werkzeug berechnet werden. Die Berechnung ist aber für die Praxis noch nicht brauchbar, weil sie noch zu deutlicher Verlängerung der Kühlzeit führt. Um hier Erfolge zu erzielen, müssen die Messungen mit Pt100-Sensoren und IR-

Sensoren ausgebaut werden. Es ist u.a. zu prüfen, ob der Einsatz von IR-Sensoren, die im Oberwerkzeug eingebaut sind und von dort die Temperatur der Schwerschicht an der Oberseite messen können, eine bessere Berechnung der mittleren Temperatur der Schwerschicht ermöglichen. Grundsätzlich muss der Einfluss von Genauigkeit und Verzögerungszeit der Sensoren auf die Berechnung sehr viel eingehender als bisher möglich untersucht werden. Sonst bleibt die "Messung/Berechnung" der Schwerschichttemperatur ein wichtiges aber unerreichtes Ziel.

Während des Projektes ist insbesondere ein unerwartetes Problem aufgetreten, welches sich auf die Verlängerung der Projektlaufzeit sowie auf die Gestaltung der FracTherm®-Kanalstrukturen ausgewirkt hat. Die Aufwicklung der zweidimensionalen FracTherm®-Kanalstrukturen in die Werkzeugkontur zurück gestaltete sich deutlich aufwändiger als vermutet. Dies hat zu einer deutlichen Verlängerung der Projektlaufzeit geführt. Außerdem entstehen nach Meinung der Projektpartner durch das starke Verbiegen der Kanäle hohe Druckverluste, die die Wirkung der Kühlung deutlich verschlechtern.

### **3.5. Bewertung der Ergebnisse**

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie als sehr positiv einzuschätzen. In den folgenden Abschnitten wird auf ökologische, technologische und ökonomische Aspekte der Ergebnisse eingegangen.

Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Ursachen für die partiell noch nicht zufriedenstellende Kühlung herauszufinden und entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung des Durchströmungsverhaltens ergreifen zu können. Je nach identifizierter Ursache können diese konstruktiver Natur sein (bessere Abdichtung zwischen Ober- und Unterteil des Werkzeugs) oder sich aber stärker auf die Verbesserung des FracTherm®-Algorithmus bzw. die Hydraulikoptimierung konzentrieren.

Grundsätzlich muss dem Hydraulikabgleich mehr Aufmerksamkeit geschenkt und müssen geeignete Simulationsmodelle entwickelt werden. Bereits in der existierenden 2D-Version von FracTherm® können die Strömungsphänomene an den Verzweigungen durch das 1D-Modell noch nicht adäquat abgebildet werden; bei 3D-Strukturen wird diese Fragestellung noch komplexer. Aus diesem Grund sollte die FracTherm®-Technologie sowohl hinsichtlich der geometrischen Algorithmen (2D-Fläche, 3D-Fläche, 3D-Volumen) als auch im Hinblick auf die hydraulischen Simulationen (CFD-Schnittstelle) und die Einbindung in CAD-Programme weiterentwickelt werden. Dieser nächste Schritt wird bereits konkret zwischen Firma Grunewald, Fraunhofer ISE und weiteren möglichen Partnern unter dem Arbeitstitel „FracTherm® Next Generation“ diskutiert.

#### **3.5.1. Ökologische Betrachtung der Projektergebnisse**

Aus ökologischer Sicht sind die in der Machbarkeitsstudie erarbeiteten Ergebnisse in der Lage, eine deutliche Verbesserung des ökologischen Fußabdruckes eines textilen automobilen Bauteils zu ermöglichen. Die mögliche Taktzeit, die für die Herstellung eines Bauteils im Formprozess benötigt wird, kann deutlich um ca. 50% reduziert werden. Es besteht sogar Potential, die benötigte Zeit noch weiter zu reduzieren, wenn die während des Projektes in Kauf genommene nicht optimale Auslegung der FracTherm®-Kanalstrukturen (Entstehung von Druckverlusten durch die Übertragung von zwei- auf dreidimensionale Strukturen) hätte beeinflusst werden können. Somit ist festzustellen, dass durch die effizientere FracTherm®-Kanalstruktur der Energieverbrauch reduziert werden kann. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass der Herstellungsprozess bei gleichbleibenden Prozess-Parametern wie Bauteil-Ausgangstemperatur, Bauteil-Zieltemperatur, Bauteil-Geometrie, Kühlwasser-Temperatur usw. sich die Dauer des Prozesses deutlich reduziert. Dabei ist eine wichtige Einflussmöglichkeit, nämlich die Ausgangs-Temperatur des Kühlwassers, noch nicht variiert worden. Diese kann möglicherweise erhöht werden, d. h. weniger Energie zur Abkühlung des Wassers eingesetzt werden, und trotzdem die Taktzeit deutlich reduziert werden. Während der Machbarkeitsstudie waren detaillierte Analysen dieser Varianten nicht möglich. Es ist eine detaillierte Untersuchung notwendig, um die optimale Abhängigkeit zwischen Temperatur des Kühlwassers sowie der daraus folgenden Abkühlzeit zu ermitteln.

Da das Werkzeug im Vergleich zur herkömmlichen Bauweise keine Edelstahl-Rohre mehr enthält, sondern hauptsächlich aus Aluminium-Guss besteht, ist auch die Rezyklierbarkeit nach der Lebensdauer gegeben. Diese beträgt in der Regel 7 Jahre ab Fertigung der ersten Vorserienteile, die immer häufiger direkt mit den späteren Serienwerkzeugen hergestellt werden. In seltenen Fällen, insbesondere bei Teilen die einem hohen Verschleiß unterliegen, werden die Werkzeuge auch für die Lieferung von Ersatzteilen nach Lebenszyklus des Fahrzeugtyps genutzt.

### **3.5.2. Technologische Betrachtung der Projekt-Ergebnisse**

Die Machbarkeit eines Aluminium-Formwerkzeuges wird mit integrierter bionischer Kühlung, in diesem Fall der FracTherm®-Kanalstruktur, aus technischer Sicht nachgewiesen. Alle während der Herstellung des Demonstrationswerkzeuges fertigungstechnischen Fragestellungen können als lösbar bezeichnet werden. Es können wertvolle Schlussfolgerungen für die Fertigung von zukünftigen Werkzeugen mit dieser Technologie gewonnen werden, bspw. wie man es verhindern könnte, dass Strömungen des Kühlwassers zwischen den Kanälen und verschiedenen FracTherm®-Kanalstrukturen entstehen und den Wirkungsgrad mindern (s. Abschnitt 3.4).

### **3.5.3. Ökonomische Betrachtung der Projektergebnisse**

Aus ökonomischer Sicht ist ein mit der FracTherm®-Kanalstruktur ausgerüstetes Werkzeug teurer als ein Werkzeug mit herkömmlichem Kühlsystem. Erste Kostenschätzungen zeigen Mehrkosten von ca. 30% aus, d. h. die Investitionskosten der Kunden der Firma Grunewald stiegen um 30%. Die Amortisation solcher Mehrkosten kann sich nach Meinung der Firma Grunewald in kürzester Zeit ergeben. Da Firma Grunewald jedoch aktuell kein Einblick in die Kalkulationsgrundlagen eines Kunden gewährt werden, ist eine detaillierte ökonomische Betrachtung momentan nicht möglich. Für die nahe Zukunft ist geplant, mit den erarbeiteten Projektergebnissen auf Kunden zuzugehen, um mit diesen zusammen eine Anwendbarkeit auf die technologischen Anforderungen hin sowie eine Wirtschaftlichkeitsberechnung vorzunehmen.

### **3.6. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse**

Die Verbreitung der Vorhabensergebnisse ist mittels einer Reihe von Vorträgen geplant, die Dr.-Ing. Michael Hermann und Ulrich Grunewald in den nächsten Monaten halten werden. Zurzeit geplante Vorträge sind:

- VDI-Fachtagung „Industrielle Anwendungen der Bionik 2015“, 30.9./01.10.2015, Esslingen
- BDGuss „Fachausschuss Druckguss“, 29.10.2015, Aachen
- Westfälische Hochschule, „2. Bionik-Workshop“, 06.11.2015, Bocholt

Im Rahmen der Hannover-Messe im April 2015 ist das Projekt auf dem Messestand der DBU einer breiten Öffentlichkeit präsentiert worden. Das Fraunhofer ISE hat dazu eine Pressemeldung veröffentlicht.

Des Weiteren bewirbt sich die Firma Grunewald mit dem Thema dieses Projektes als Aussteller bei der „Woche der Umwelt“, die am 7. und 8. Juni 2016 in Berlin stattfinden wird.

## 4. Fazit

Zusammengefasst können die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie als sehr positiv erachtet werden. Der Erkenntnisgewinn bei den Projektpartnern sowie den Unterauftragnehmern ist gewachsen und wird für zukünftige Entwicklungen genutzt werden.

Die Firma Grunewald kann aus fertigungstechnischer Sicht die Ergebnisse für die Weiterentwicklung der in diesem Projekt betrachteten Werkzeugtechnologie nutzen.

Insbesondere der fertigungstechnologische wie der aus der FEM-Simulation gewonnene Erkenntnisgewinn der mehr als halbierten Kühlzeit kann bei Kunden eingesetzt werden.

Während der Versuche mit dem Demonstrationswerkzeug sind einige Probleme hinsichtlich Undichtigkeiten und Druckverlusten aufgetreten, die in nicht optimaler Kühlung resultierten. Die Firma Grunewald plant in Kürze diese Themen im Rahmen von Projekt- und /oder Bachelorarbeiten von Studenten am Demonstrationswerkzeug bearbeiten zu lassen. Für das im letzten Absatz dieses Kapitels aufgeführte zukünftige Vorhaben sind dies wichtige Grundlagen. Außerdem soll in diesen Arbeiten auf die Variation der Kühlwassertemperatur und die Ermittlung von idealen Parametern abgezielt werden.

In der Kundenakquise bzw. in bestehenden Kundenkontakten werden die Ergebnisse insofern verwertet, als dass Firma Grunewald diese Technologie mit verschiedenen Kunden diskutieren wird und möglicherweise erste Werkzeuge mit der Technologie ausstatten kann, auch wenn zur Zeit noch keine marktfähige Softwarelösung vorliegt. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE kann jedoch eine Werkzeugkonstruktion für die bereits erkundete Werkzeug-Technologie erstellt werden, wie es auch bei der vorliegenden Machbarkeitsstudie bereits umgesetzt worden ist. Damit können die Kunden die entwickelte Technologie testen und Erfahrungen damit sammeln.

Darüber hinaus kann sich die Firma Grunewald vorstellen, mit dem Fraunhofer ISE zusammen eine marktreife Software zu entwickeln, mit der der Anwender in der Lage ist, eine FracTherm®-Kanalstruktur nach seinen Bedürfnissen zu erstellen. Diese Software könnte möglicherweise in der Lage sein, für verschiedenste Anwendungen, in denen Kühlung wie auch Beheizung benötigt wird, Lösungen anzubieten. Das denkbare Spektrum der Anwendungsfälle geht dabei weit über den in der Machbarkeitsstudie umgesetzten Anwendungsfall hinaus, wie folgende Auflistung zeigt:

- Werkzeugbau:
  - Druck- und Spritzgussanwendungen
  - RTM (resin transfer moulding)-anwendungen
  - CFK-Anwendungen
  - Blasformen
  - Andere Werkzeug-Technologien
- Anwendungsbereiche außerhalb des Werkzeugbaus
  - Temperierung von Gussteilen für verschiedene Anwendungsbereiche
    - Antriebstechnik (Kühlung von Motoren, Turbinen)
    - Maschinenbau (Temperierung Maschinenkomponenten zur Kompensation von temperaturbedingten Abweichungen, ...)
- Weitere Anwendungen

Dabei sind mögliche nächste Schritte die Durchführung einer Potentialanalyse für o.g. sowie weitere denkbare Anwendungsfälle. Dazu gehört auch die gleichzeitige Bewertung der möglichen Umsetzung in eine marktfähige Software, die von Anfang an die verschiedenen Anwendungsfälle und die Belange eines Softwareherstellers bzw. -programmierers berücksichtigt.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] TATTERSALL, G. J. ; ANDRADE, D. V. ; ABE, A. S.: *Heat exchange from the toucan bill reveals a controllable vascular thermal radiator*. In: *Science* 325 (2009), Nr. 5939, S. 468–470
- [2] WEISSENBÖCK, Nicole M. ; ARNOLD, Walter ; RUF, Thomas: *Taking the heat: thermoregulation in Asian elephants under different climatic conditions*. In: *Journal of Comparative Physiology B* 182 (2012), Nr. 2, S. 311–319
- [3] HEINRICH, Bernd: *Heat exchange in relation to blood flow between thorax and abdomen in bumblebees*. In: *Journal of Experimental Biology* 64 (1976), Nr. 3, S. 561–585
- [4] SHADWICK, R. E.: *Mechanical design in arteries*. In: *The Journal of Experimental Biology* 202 (1999), S. 3305–3313
- [5] RENDI, Mohamad ; VIRIDI, Sparisoma: *Modeling Of Blood Vessel Constriction In 2-D Case Using Molecular Dynamics Method*. In: *arXiv preprint arXiv:1306.6045* (2013)
- [6] BAUMANN, Frithjof ; VÖLKLE, Dietmar: *Formen und Werkzeuge mit einem feingliedrig verzweigten Temperierkanalnetzwerk, ihre Formen und Werkzeuge mit einem feingliedrig verzweigten Temperierkanalnetzwerk, ihre Verwendung und Verfahren zur Temperierung von Formen und Werkzeugen*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung E.V. Anmeldenr. 98102019.1, Deutschland. 12.08.1998. Deutschland. Veröffentlichungsnr. EP 0 857 554 A2. IPC B29C 33/04
- [7] HERMANN, Michael: *Bionische Ansätze zur Entwicklung energieeffizienter Fluidsysteme für den Wärmetransport*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. 2005
- [8] HERMANN, Michael: *FracTherm<sup>®</sup> Sonnenkollektoren und Wärmetauscher mit optimierten Strömungskanälen*
- [9] HERMANN, Michael: *Verfahren zur Erstellung eines Hydrauliknetzwerkes für einen optimierten Wärmeübertragungs- und Stofftransport*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE. Anmeldenr. 103 19 367.7, Deutschland. 25.11.2004. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 103 19 367 A1. IPC F17D 1/08
- [10] REICHARD, Jonathan D. ; PRAJAPATI, Suresh I. ; AUSTAD, Steven N. ; KELLER, Charles ; KUNZ, Thomas H.: *Thermal windows on Brazilian free-tailed bats facilitate thermoregulation during prolonged flight*. In: *Integrative and Comparative Biology* 50 (2010), Nr. 3, S. 358–370
- [11] TERO, A. ; TAKAGI, S. ; SAIGUSA, T. ; ITO, K. ; BEBBER, D. P. ; FRICKER, M. D. ; YUMIKI, K. ; KOBAYASHI, R. ; NAKAGAKI, T.: *Rules for biologically inspired adaptive network design*. In: *Science* 327 (2010), Nr. 5964, S. 439–442
- [12] CORSON, Francis: *Fluctuations and redundancy in optimal transport networks*. In: *Physical review letters* 104 (2009), S. 048703 (1-4)
- [13] KATIFORI, Eleni ; SZÖLLÖSI, Gergely J. ; MAGNASCO, Marcelo O.: *Damage and fluctuations induce loops in optimal transport networks*. In: *Physical review letters* 104 (2010), Nr. 4, S. 48704 (1-4)
- [14] KULL, Ulrich ; HERBIG, Astrid: *Das Blattadersystem der Angiospermen: Form und Evolution*. In: *Naturwissenschaften* 82 (1995), Nr. 10, S. 441–451
- [15] LAGUNA, Maria F. ; BOHN, Steffen ; JAGLA, Eduardo A.: *The role of elastic stresses on leaf venation morphogenesis*. In: *PLoS computational biology* 4 (2008), Nr. 4, S. e1000055
- [16] WOLPERT, Arlen: *Heat transfer analysis of factors affecting Plant leaf Temperature. Significance of leaf hair*. In: *Plant Physiology* 37 (1962), Nr. 2. URL <http://www.plantphysiol.org/content/37/2/113.full.pdf> – Überprüfungsdatum 2015-02-25

- [17] MYHRVOLD, Conor L. ; STONE, Howard A. ; BOU-ZEID, Elie: *What is the use of elephant hair?* In: *PLoS ONE* 7 (2012), Nr. 10, S. e47018
- [18] TAYLOR, C. R. ; LYMAN, C. P.: *Heat storage in running antelopes: independence of brain and body temperatures.* In: *The American Journal of Physiology* 222 (1972), Nr. 1, S. 114–117
- [19] TAYLOR, C.R. ; ROUNDTREE, V.: *Temperature regulation and heat balance in running cheetah: a strategy for sprinters?* In: *American Journal of Physiology* (1973), Nr. 224, S. 848–851
- [20] SCHMIDT-NIELSEN, K. ; SCHROTER, R. C. ; SHKOLNIK, A.: *Desaturation of exhaled air in camels.* In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 211 (1981), Nr. 1184, S. 305–319
- [21] HUNTLEY, Anthony C. ; COSTA, Daniel P. ; RUBIN, R. D.: *The contribution of nasal countercurrent heat exchange to water balance in the northern elephant seal, *Mirounga angustirostris*.* In: *Journal of Experimental Biology* 113 (1984), Nr. 1, S. 447–454
- [22] PABST, D. A. ; ROMMEL, S. A. ; MCLELLAN, W. A. ; WILLIAMS, T. M. ; ROWLES, T. K.: *Thermoregulation of the intra-abdominal testes of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) during exercise.* In: *Journal of Experimental Biology* 198 (1995), Nr. 1, S. 221–226
- [23] ROMMEL, S. A. ; PABST, D. A. ; MCLELLAN, W. A. ; WILLIAMS, T. M. ; FRIEDL, W. A.: *Temperature regulation of the testes of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*): evidence from colonic temperatures.* In: *Journal of Comparative Physiology B* 164 (1994), Nr. 2, S. 130–134
- [24] TARASOFF, F. J. ; FISHER, H. Dean: *Anatomy of the hind flippers of two species of seals with reference to thermoregulation.* In: *Canadian Journal of Zoology* 48 (1970), Nr. 4, S. 821–829
- [25] KHAMAS, Wael A. ; SMODLAKA, Hrvoje ; LEACH-ROBINSON, Jessica ; PALMER, Lauren: *Skin histology and its role in heat dissipation in three pinniped species.* In: *Acta Veterinaria Scandinavica* 54 (2012), Nr. 46, S. 1–10
- [26] ROMMEL, Sentiel A. ; CAPLAN, Heather: *Vascular adaptations for heat conservation in the tail of Florida manatees (*Trichechus manatus latirostris*).* In: *Journal of anatomy* 202 (2003), Nr. 4, S. 343–353
- [27] CHIERUZZI, Manila ; CERRITELLI, Gian F. ; MILIOZZI, Adio ; KENNY, José M.: *Effect of nanoparticles on heat capacity of nanofluids based on molten salts as PCM for thermal energy storage.* In: *Nanoscale research letters* 8 (2013), Nr. 448, S. 1–9
- [28] MIRZAEI, Mostafa ; DEGHAN, Maziar: *Investigation of flow and heat transfer of nanofluid in microchannel with variable property approach.* In: *Heat and Mass Transfer* 49 (2013), Nr. 12, S. 1803–1811
- [29] PHILIP, John ; SHIMA, P. D.: *Thermal properties of nanofluids.* In: *Advances in Colloid and Interface Science* 183-184 (2012), S. 30–45
- [30] HERMANN M., *Bionische Ansätze zur Entwicklung energieeffizienter Fluidsysteme für den Wärmetransport. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe (TH) (2005)*

## 6. Anhänge

### A1: Auflistung der genutzten Datenbanken und deren Schwerpunkte:

#### arXiv: arXiv.org e-Print archive

<http://arXiv.org/>

Open Access auf e-prints im Bereich der Physik, Mathematik, Informatik, und Quantitativen Biologie. Gehört zu den Kategorien: Physik, Mathematik, Informatik, und Quantitativen Biologie

#### PDB: Protein Data Bank (PDB)

<http://www.rcsb.org/pdb/home/home.do>

Zentrale Datenbank für Strukturdaten biologischer Makromoleküle. Sie enthält experimentell bestimmte Strukturen von Proteinen, Nukleinsäuren und komplexen Molekül-Aggregaten. Gehört zu den Kategorien: Biologie, Chemie.

#### Pubmed: Pubmed

<http://www.pubmedcentral.nih.gov>

PubMed Central (PMC) ist das freie digitale Archiv des U.S. National Institutes of Health (NIH) mit Zeitschriftenartikeln zu Biomedizin und Life Sciences. Gehört zu den Kategorien: Biologie, Medizin.

#### TecFinder: TecFinder: Technik und Management (WTI):

<http://tecfinder.fiz-technik.de/tecfinder/faces/facelets/search/search.jsp?DB=tema&APPL=fh-gelsenkirchen>

Die Datenbanken des WTI-Frankfurt eG - Wissenschaftlich-Technische Information (ehem. FIZ Technik) - enthalten nationale und internationale Literaturhinweise aus Zeitschriften, Konferenzberichten, Forschungsberichten, Dissertationen und Büchern aus folgenden Bereichen: Maschinen- und Anlagenbau (DOMA) / Elektrotechnik/Elektronik, Informations- und Kommunikationstechnik / Metallische und nichtmetallische Werkstoffe, Glas, Keramik und Verbundwerkstoffe / Energietechnik / Textiltechnik / Medizinische Technik / Bergbau.

Gehört zu den Kategorien: Elektrotechnik, Informatik, Maschinenbau, Biologie, Versorgung/Entsorgung/Facilities Management, Medizin, Wirtschaft.

#### Scifinder: SciFinder Scholar 2007

<https://scifinder.cas.org/scifinder>

SciFinder steht als Web-Version zur Verfügung. SciFinder ermöglicht den Zugriff auf Datenbanken, die Literatur und Patente verschiedenster Wissenschaftsgebiete abdecken. Die Schwerpunkte liegen bei Biomedizin, Chemie, Technik, Werkstoff- und Umweltwissenschaften.

Gehört zu den Kategorien: Chemie, Biologie, Patente, Medizin.

#### depatisnet: DepatisNet

<http://depatisnet.dpma.de/>

Recherche von Patent-Veröffentlichungen aus aller Welt, soweit sie sich im Bestand des Patentinformationssystems DEPATIS befinden. Kostenlose Volltextanzeige.

Gehört zur Kategorie: Patente.

#### ask nature: ask Nature

<http://www.asknature.org>

AskNature is a free, open source project, built by the community and for the community. It is a bio-inspiration website where innovators can learn from nature's solutions, biologists can find a whole new audience for their research, students can be inspired through science, and collaborators from different disciplines can work together to create innovative, sustainable, bio-inspired designs.

Gehört zur Kategorie: Biologie

Anhang A2: Liste der verwendeten Suchbegriffe

| Suchbegriff              |          | DATENBANK |            |     |        |           |            |           |                |
|--------------------------|----------|-----------|------------|-----|--------|-----------|------------|-----------|----------------|
| Deutsch                  | Englisch | arXiv     | ask nature | PDB | Pubmed | SciFinder | Teclfinder | depatisne | Google Scholar |
| Alligator                |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Aye Aye / Fingertier     |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | teils     | x              |
| Adern                    |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Elefant (Ohren / Haare)  |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Fledermaus               |          | x         | x          | x   | x      | teils     | x          | -         | x              |
| Gegenstromprinzip        |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Giraffe                  |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Guss / Gießerei / gießen |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Hase                     |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Hummel                   |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Kanal (Kühkanal)         |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Kokille                  |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Kühlsysteme              |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Kühlung                  |          | x         | x          | x   | x      | x         | teils      | x         | x              |
| Kühlmittel (Phasen)      |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Luftkühlung              |          | x         | x          | x   | x      | x         | teils      | x         | x              |
| Oberflächen              |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Thermoregulation         |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Toucan                   |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Thermisches Reservoir    |          | x         | x          | x   | x      | teils     | x          | x         | x              |
| Temperaturpuffer         |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Werkzeuge                |          | x         | x          | x   | x      | teils     | x          | x         | x              |
| Werkzeugkühlung          |          | x         | x          | x   | x      | teils     | teils      | x         | x              |
| Wärmetauscher/-system    |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Wärmetransport           |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | f              |
| Wärmeleitung             |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Verdunstung              |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Produktionskapazität     |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Stückzahl                |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Prozessbeschleunigung    |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Blood flow               |          | x         | x          | x   | x      | teils     | x          | -         | x              |
| Buffer                   |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Capillary (ch            |          | x         | x          | x   | teils  | x         | teils      | x         | x              |
| Castling                 |          | x         | x          | x   | teils  | x         | x          | x         | x              |
| Channel                  |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Convection               |          | x         | x          | x   | x      | x         | teils      | x         | x              |
| Cooling                  |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Cooling syst             |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Countercurr              |          | x         | x          | x   | x      | teils     | x          | x         | x              |
| Elephant                 |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Evaporation              |          | x         | x          | x   | -      | teils     | x          | x         | x              |
| Fractherm                |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Gular Pouch              |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Gular flutter            |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Heat transm              |          | x         | x          | x   | teils  | x         | x          | x         | x              |
| Heating                  |          | x         | x          | x   | -      | x         | x          | x         | x              |
| Hot spot                 |          | x         | x          | x   | teils  | x         | x          | x         | x              |
| Jack rabbit              |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Nasal surface            |          | x         | x          | x   | -      | x         | x          | -         | x              |
| Thermoregu               |          | x         | x          | x   | -      | x         | x          | x         | x              |
| Thermoadap               |          | x         | x          | x   | -      | x         | x          | -         | x              |
| Thermodiss               |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Tucan                    |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | -         | x              |
| Veins                    |          | x         | x          | x   | x      | teils     | x          | -         | x              |
| Vessels                  |          | x         | x          | x   | x      | teils     | x          | -         | x              |
| Water vapor              |          | x         | x          | x   | teils  | x         | x          | x         | x              |
| Nanofluids               |          | x         | x          | x   | teils  | x         | x          | x         | x              |
| Wärmeträgersuspension    |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Heat carrier             |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | teils     | x              |
| Werkzeugtemperierung     |          | x         | x          | x   | x      | x         | teils      | x         | x              |
| Heatpipes                |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Hot spot coo             |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| Heat pipes c             |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| solidification           |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| enhancement              |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| enhanced...              |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| network (str             |          | x         | x          | x   | x      | x         | x          | x         | x              |
| carbon nano              |          | teils     | teils      |     |        |           |            |           |                |
| heat conduc              |          | teils     |            |     |        |           |            |           |                |

| In Citavi eingearbeitete IPC-Bereiche |    |   |    |   |     |
|---------------------------------------|----|---|----|---|-----|
| B                                     | 22 | D | 15 | / | 4   |
| B                                     | 22 | D | 17 | / | 22  |
| B                                     | 22 | D | 11 | / | 112 |
| B                                     | 22 | D | 11 | / | 20  |
| B                                     | 21 | C | 29 | / | 0   |
| B                                     | 29 | C | 33 | / | 4   |
| B                                     | 29 | C | 45 | / | 73  |
| B                                     | 29 | C | 1  | / | 0   |
| B                                     | 29 | C | 17 | / | 3   |
| B                                     | 23 | Q | 11 | / | 10  |
| F                                     | 24 | J | 2  | / | 0   |
| F                                     | 16 | L | 9  | / | 19  |
| F                                     | 28 | F | 3  | / | 2   |
| F                                     | 27 | D | 17 | / | 0   |
| F                                     | 17 | D | 1  | / | 8   |
| F                                     | 25 | B | 41 | / | 0   |
| F                                     | 28 | D | 7  | / | 10  |
| F                                     | 28 | D | 15 | / | 2   |
| F                                     | 28 | D | 15 | / | 4   |
| F                                     | 28 | D | 1  | / | 3   |
| F                                     | 28 | F | 1  | / | 36  |
| F                                     | 28 | F | 21 | / | 6   |
| B                                     | 22 | D | 11 | / | 55  |
| B                                     | 22 | D | 11 | / | 55  |

|           |                                                                                                                          |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>B</b>  | Arbeitsverfahren; Transportieren                                                                                         |
| <b>22</b> | Gießerei; Pulvermetallurgie                                                                                              |
| <b>D</b>  | Gießen von Metallen; Gießen anderer Werkstoffe nach den gleichen Verfahren oder mit den gleichen Vorrichtungen           |
| <b>29</b> | Verarbeiten von Kunststoffen; Verarbeiten von Stoffen im plastischen Zustand allgemein                                   |
| <b>C</b>  | Formen oder Verbinden von Kunststoffen; Formen von Kunststoffen im plastischen Zustand allgemein; Nachbehandlung geformt |
| <b>F</b>  | Maschinenbau; Beleuchtung; Heizung; Waffen; Sprengen                                                                     |
| <b>28</b> | Wärmetausch allgemein                                                                                                    |
| <b>D</b>  | Wärmetauscher, soweit in keiner anderen Unterklasse vorgesehen, in denen die Wärmetauscher nicht in direkte Berührung    |
| <b>F</b>  | Einzelheiten von Wärmetauschern oder Wärmeübertragungsvorrichtungen für allgemeine Verwendung                            |

## Anhang A3: Literaturliste bzw. Gesamt-Ergebnis der Literaturrecherche

### Literaturliste

Sortiert nach Dokumententyp und der eindeutigen Laufnummer aus dem Literaturverwaltungsprogramm Citavi

#### Zeitschriftenaufsatz

- [#002] FRANKLIN, Craig E. ; SEEBACHER FRANK: *The effect of heat transfer mode on heart rate responses and hysteresis during heating and cooling in the estuarine crocodile *Crocodylus porosus**. In: *The Journal of Experimental Biology* 206 (2003), Nr. 7, S. 1143–1151
- [#003] ELKHAWAD, A. O. ; AL-ZAID, N. S. ; BOU-RESLI, M. N.: *Facial vessels of desert camel (*Camelus dromedarius*): role in brain cooling*. In: *The American Journal of Physiology* 258 (1990), 3 Pt 2, S. R602-7
- [#013] NICOLSON, S. W.: *Water homeostasis in bees, with the emphasis on sociality*. In: *Journal of Experimental Biology* 212 (2009), Nr. 3, S. 429–434
- [#015] WATHEN, Patricia ; MITCHELL, John W. ; PORTER, Warren P.: *Theoretical and experimental studies of energy exchange from jackrabbit ears and cylindrically shaped appendages*. In: *Biophysical Journal* 11 (1971), Nr. 12, S. 1030–1047
- [#016] HILL, R. W. ; VEGHTE, J. H.: *Jackrabbit ears: surface temperatures and vascular responses*. In: *Science* 194 (1976), Nr. 4263, S. 436–438
- [#017] MOHLER, F. S. ; HEATH, J. E.: *Comparison of IR thermography and thermocouple measurement of heat loss from rabbit pinna*. In: *The American Journal of Physiology* 254 (1988), 2 Pt 2, S. R389-95
- [#018] REICHARD, Jonathan D. ; FELLOWS, Spenser R. ; FRANK, Alexander J. ; KUNZ, Thomas H.: *Thermoregulation during flight: body temperature and sensible heat transfer in free-ranging Brazilian Free-Tailed Bats (*Tadarida brasiliensis*)*. In: *Physiological and Biochemical Zoology* 83 (2010), Nr. 6, S. 885–897
- [#019] REICHARD, Jonathan D. ; PRAJAPATI, Suresh I. ; AUSTAD, Steven N. ; KELLER, Charles ; KUNZ, Thomas H.: *Thermal windows on Brazilian free-tailed bats facilitate thermoregulation during prolonged flight*. In: *Integrative and Comparative Biology* 50 (2010), Nr. 3, S. 358–370
- [#020] POTTER, Kristen ; DAVIDOWITZ, Goggy ; WOODS, H. Arthur: *Insect eggs protected from high temperatures by limited homeothermy of plant leaves*. In: *The Journal of Experimental Biology* 212 (2009), S. 3448–3454
- [#023] HEINRICH, Bernd: *Heat exchange in relation to blood flow between thorax and abdomen in bumblebees*. In: *Journal of Experimental Biology* 64 (1976), Nr. 3, S. 561–585
- [#026] LASIEWSKI, Robert C.: *Physiological responses to heat stress in the poorwill*. In: *American Journal of Physiology* 217 (1969), Nr. 5, S. 1504–1509
- [#029] BRANCO, L. G. ; PÖRTNER, H. O. ; WOOD, S. C.: *Interaction between temperature and hypoxia in the alligator*. In: *The American Journal of Physiology* 265 (1993), 6 Pt 2, S. R1339-43
- [#032] TAYLOR, C. R. ; LYMAN, C. P.: *Heat storage in running antelopes: independence of brain and body temperatures*. In: *The American Journal of Physiology* 222 (1972), Nr. 1, S. 114–117
- [#033] TAYLOR, C.R. ; ROUNDTREE, V.: *Temperature regulation and heat balance in running cheetah: a strategy for sprinters?* In: *American Journal of Physiology* (1973), Nr. 224, S. 848–851
- [#034] ISHAY, Jacob S. ; PLOTKIN, Marian ; ERMAKOV, Natalya Y. ; VOLYNCHIK, Stanislav ; BARKAY, Zahava ; BERGMAN, David J.: *The thermogenic center in social wasps*. In: *Journal of Electron Microscopy* 55 (2006), Nr. 1, S. 41–49
- [#035] VOLYNCHIK, Stanislav ; PLOTKIN, Marian ; ERMAKOV, Natalya Y. ; BERGMAN, David J. ; ISHAY, Jacob S.: *Presence of a thermoregulatory hot spot in the prothorax of the large carpenter bee and the bumble bee*. In: *Microscopy Research and Technique* 69 (2006), Nr. 11, S. 903–912
- [#037] KULL, Ulrich ; HERBIG, Astrid: *Das Blattadersystem der Angiospermen: Form und Evolution*. In: *Naturwissenschaften* 82 (1995), Nr. 10, S. 441–451
- [#038] SCHLICHTING, H. Joachim ; NORDMEIER, Volkhard ; BUTTKUS, Beate: *Wie fraktal ist der Mensch?* In: *Physik in der Schule* 31/9 (1993), Nr. 310, S. 1–4

- [#039] PEDLEY, T. J. ; BROOK, B. S. ; SEYMOUR, Roger Scott: *Blood pressure and flow rate in the giraffe jugular vein*. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 351 (1996), Nr. 1342, S. 855–866
- [#042] DAUNGHONGSUK, Weerapun ; WONGWISES, Somchai: *A critical review of convective heat transfer of nanofluids*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007), Nr. 5, S. 797–817 – Überprüfungsdatum 2013-10-01
- [#043] TATTERSALL, G. J. ; ANDRADE, D. V. ; ABE, A. S.: *Heat exchange from the toucan bill reveals a controllable vascular thermal radiator*. In: *Science* 325 (2009), Nr. 5939, S. 468–470
- [#046] NEEDHAM, A. D. ; DAWSON, T. J. ; HALES, J. R. S.: *Forelimb blood flow and saliva spreading in the thermoregulation of the red kangaroo, *Megaleia rufa**. In: *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology* 49 (1974), Nr. 3, S. 555–565
- [#048] PABST, D. A. ; ROMMEL, S. A. ; MCLELLAN, W. A. ; WILLIAMS, T. M. ; ROWLES, T. K.: *Thermoregulation of the intra-abdominal testes of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) during exercise*. In: *Journal of Experimental Biology* 198 (1995), Nr. 1, S. 221–226
- [#050] HEINRICH, Bernd: *Thermoregulation by winter-flying endothermic moths*. In: *Journal of Experimental Biology* 127 (1987), Nr. 1, S. 313–332
- [#051] DALY, T. Joseph M. ; BUFFENSTEIN, Rochelle: *Skin morphology and its role in thermoregulation in mole-rats, *Heterocephalus glaber* and *Cryptomys hottentotus**. In: *Journal of anatomy* 193 (1998), Nr. 4, S. 495–502
- [#052] ARAD, Zeev ; MIDTGÅRD, Uffe ; BERNSTEIN, Marvin H.: *Thermoregulation in turkey vultures. Vascular anatomy, arteriovenous heat exchange, and behavior*. In: *The Condor. A Journal of Avian Biology* 91 (1989), Nr. 3, S. 505–514
- [#056] ISHAY, Jacob S. ; PERTSIS, Vitaly ; RAVE, Eran ; GOREN, Alon ; BERGMAN, David J.: *Natural thermoelectric heat pump in social wasps*. In: *Physical review letters* 90 (2003), Nr. 21, S. 218102-1 -218102-4
- [#063] HUNTLEY, Anthony C. ; COSTA, Daniel P. ; RUBIN, R. D.: *The contribution of nasal countercurrent heat exchange to water balance in the northern elephant seal, *Mirounga angustirostris**. In: *Journal of Experimental Biology* 113 (1984), Nr. 1, S. 447–454
- [#064] CAREY, Francis G. ; TEAL, John M.: *Heat conservation in tuna fish muscle*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 56 (1966), Nr. 5, S. 1464
- [#066] WHITE, Matthew D. ; GREINER, Jesse G. ; McDONALD, Patrick L. L.: *Point: humans do demonstrate selective brain cooling during hyperthermia*. In: *Journal of Applied Physiology* 110 (2011), Nr. 2, S. 569–571
- [#067] ROMMEL, Sentiel A. ; CAPLAN, Heather: *Vascular adaptations for heat conservation in the tail of Florida manatees (*Trichechus manatus latirostris*)*. In: *Journal of anatomy* 202 (2003), Nr. 4, S. 343–353
- [#068] ROMMEL, S. A. ; PABST, D. A. ; MCLELLAN, W. A. ; WILLIAMS, T. M. ; FRIEDL, W. A.: *Temperature regulation of the testes of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*): evidence from colonic temperatures*. In: *Journal of Comparative Physiology B* 164 (1994), Nr. 2, S. 130–134
- [#069] TIELEMAN, B. Irene ; WILLIAMS, Joseph B. ; MICHAELI, Gilead ; PINSHOW, Berry: *The role of the nasal passages in the water economy of crested larks and desert larks*. In: *Physiological and Biochemical Zoology* 72 (1999), Nr. 2, S. 219–226
- [#073] JASWON, M. A. ; SMITH, W.: *Countercurrent transfer processes in the non-steady state*. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 225 (1954), Nr. 1161, S. 226–244
- [#075] STANDORA, Edward A. ; SPOTILA, James R. ; FOLEY, Robert E.: *Regional endothermy in the sea turtle, *Chelonia mydas**. In: *Journal of Thermal Biology* 7 (1982), Nr. 3, S. 159–165
- [#078] PALLONE, Thomas L. ; TURNER, Malcolm R. ; EDWARDS, Aurélie ; JAMISON, Rex L.: *Countercurrent exchange in the renal medulla*. In: *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 284 (2003), Nr. 5, S. R1153-R1175
- [#095] MYHRVOLD, Conor L. ; STONE, Howard A. ; BOU-ZEID, Elie: *What is the use of elephant hair?* In: *PLoS ONE* 7 (2012), Nr. 10, S. e47018

- [#096] WEISSENBÖCK, Nicole M. ; ARNOLD, Walter ; RUF, Thomas: *Taking the heat: thermoregulation in Asian elephants under different climatic conditions*. In: *Journal of Comparative Physiology B* 182 (2012), Nr. 2, S. 311–319
- [#97] KHAMAS, Wael A. ; SMODLAKA, Hrvoje ; LEACH-ROBINSON, Jessica ; PALMER, Lauren: *Skin histology and its role in heat dissipation in three pinniped species*. In: *Acta Veterinaria Scandinavica* 54 (2012), Nr. 46, S. 1–10
- [#098] PHILLIPS, P. K. ; HEATH, J. E.: *Heat exchange by the pinna of the African elephant (Loxodonta africana)*. In: *Comparative Biochemistry and Physiology* 101 (1992), Nr. 4, S. 693–699
- [#099] PHILLIPS, Polly K. ; HEATH, James E.: *Dependency of surface temperature regulation on body size in terrestrial mammals*. In: *Journal of Thermal Biology* 20 (1995), Nr. 3, S. 281–289
- [#106] WEINER, S. A. ; UPTON, C. T. ; NOBLE, K. ; WOODS JR, W. A. ; STARKS, P. T.: *Thermoregulation in the primitively eusocial paper wasp, Polistes dominulus*. In: *Insectes sociaux* 57 (2010), Nr. 2, S. 157–162
- [#107] MIRZAEI, Mostafa ; DEGHAN, Maziar: *Investigation of flow and heat transfer of nanofluid in microchannel with variable property approach*. In: *Heat and Mass Transfer* 49 (2013), Nr. 12, S. 1803–1811
- [#108] SEEBACHER, Frank ; FRANKLIN, Craig E.: *Redistribution of blood within the body is important for thermoregulation in an ectothermic vertebrate (Crocodylus porosus)*. In: *Journal of Comparative Physiology B* 177 (2007), Nr. 8, S. 841–848
- [#109] ØSTERGAARD, Kristine Hovkjær ; BERTELSEN, Mads F. ; BRØNDUM, Emil T. ; AALKJÆR, Christian ; HASENKAM, J. Michael ; SMERUP, Morten ; WANG, Tobias ; NYENGAARD, Jens Randel ; BAANDRUP, Ulrik: *Pressure profile and morphology of the arteries along the giraffe limb*. In: *Journal of Comparative Physiology B* 181 (2011), Nr. 5, S. 691–698
- [#110] TOUSSAINT, Dawn Cory ; MCKECHNIE, Andrew E.: *Interspecific variation in thermoregulation among three sympatric bats inhabiting a hot, semi-arid environment*. In: *Journal of Comparative Physiology B* 182 (2012), Nr. 8, S. 1129–1140
- [#111] NOAKES, Matthew J. ; SMIT, Ben ; WOLF, Blair O. ; MCKECHNIE, Andrew E.: *Thermoregulation in African Green Pigeons (Treron calvus) and a re-analysis of insular effects on basal metabolic rate and heterothermy in columbid birds*. In: *Journal of Comparative Physiology B* (2013), S. 1–14
- [#113] LAUSEN, Cori L. ; BARCLAY, Robert M. R.: *Thermoregulation and roost selection by reproductive female big brown bats (Eptesicus fuscus) roosting in rock crevices*. In: *Journal of Zoology* 260 (2003), Nr. 03, S. 235–244
- [#117] MORITZ, GILLIAN, L. ; DOMINY, Nathaniel J.: *Thermal Imaging of Aye-Ayes (Daubentonia madagascariensis) Reveals a Dynamic Vascular Supply During Haptic Sensation*. In: *International Journal of Primatology* 33 (2012), Nr. 3, S. 588–587
- [#120] WATLING, Jennifer R. ; ROBINSON, Sharon A. ; SEYMOUR, Roger S.: *Contribution of the Alternative Pathway to Respiration during Thermogenesis in Flowers of the Sacred Lotus*. In: *Plant Physiology* 140(4), S. 1367–1373
- [#135] TARASOFF, F. J. ; FISHER, H. Dean: *Anatomy of the hind flippers of two species of seals with reference to thermoregulation*. In: *Canadian Journal of Zoology* 48 (1970), Nr. 4, S. 821–829
- [#137] LAGUNA, Maria F. ; BOHN, Steffen ; JAGLA, Eduardo A.: *The role of elastic stresses on leaf venation morphogenesis*. In: *PLoS computational biology* 4 (2008), Nr. 4, S. e1000055
- [#138] KATIFORI, Eleni ; SZÖLLÖSI, Gergely J. ; MAGNASCO, Marcelo O.: *Damage and fluctuations induce loops in optimal transport networks*. In: *Physical review letters* 104 (2010), Nr. 4, S. 48704 (1-4)
- [#142] ZAKHAROV, Michael ; SADOVSKY, Michael: *The role of blood circulatory system in thermal regulation of animals explained by entropy production analysis*. In: *arXiv preprint arXiv:1308.3663*
- [#143] SZÉCHENYI, Gábor ; PÁLYI, András: *Current hot spot in the spin-valley blockade in carbon nanotubes*. In: *Physical Review B* 88 (2013), Nr. 235414, S. 1–9
- [#145] G. MITCHEL, J. D. SKINNER: *Giraffe thermoregulation: a review*. In: *Transactions of the Royal Society of South Africa* 59 (2004), Nr. 2, S. 109–118
- [#146] HUAN, Zhongjie ; JORDAAN, G. D.: *Galerkin finite element analysis of spin casting cooling process*. In: *Applied Thermal Engineering* 24 (2004), Nr. 1, S. 95–110
- [#152] PHILIP, John ; SHIMA, P. D. ; RAJ, Baldev: *Evidence for enhanced thermal conduction through percolating structures in nanofluids*. In: *Nanotechnology* 19 (2008), Nr. 30, S. 305706 (7pp)

- [#153] PHILIP, John ; SHIMA, P. D.: *Thermal properties of nanofluids*. In: *Advances in Colloid and Interface Science* 183-184 (2012), S. 30–45
- [#154] ZIMMERMANN, T. ; SCHINKÖTHE, W.: *Variotherm, aber trotzdem schnell*. In: *Plastverarbeiter* 62 (2011), Nr. 7, S. 42–45. URL <http://www.plastverarbeiter.de/texte/anzeigen/10484/Variotherm-aber-trotzdem-schnell> – Überprüfungsdatum 2013-12-07
- [#155] ZINCKGRAF, S.: *Ein gutes Team für mehr Ästhetik*. In: *Plastverarbeiter* 63 (2012), Nr. 3, S. 68–71. URL <http://www.plastverarbeiter.de/texte/anzeigen/11662/Ein-gutes-Team-fuer-mehr-AEsthetik> – Überprüfungsdatum 2013-12-07
- [#158] STABENTHEINER, Anton ; KOVAC, Helmut ; HETZ, Stefan K. ; KÄFER, Helmut ; STABENTHEINER, Gabriel: *Assessing honeybee and wasp thermoregulation and energetics—New insights by combination of flow-through respirometry with infrared thermography*. In: *Thermochimica Acta* 534 (2012), S. 77–86
- [#162] SHAFABI, Maryam ; BIANCO, Vincenzo ; VAFAI, Kambiz ; MANCA, Oronzio: *An investigation of the thermal performance of cylindrical heat pipes using nanofluids*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010), S. 376–383
- [#163] YANG, Honghai ; KHANDEKAR, Sameer ; GROLL, Manfred: *Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders*. In: *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009), Nr. 4, S. 815–824
- [#164] RIEHL, Roger R. ; SANTOS, DOS SANTOS, NADJARA: *Water-copper nanofluid application in an open loop pulsating heat pipe*. In: *Applied Thermal Engineering* 42 (2012), S. 6–10
- [#165] CHEN, Yongping ; ZHANG, Chengbin ; SHI, Mingheng ; WU, Jiafeng ; PETERSON, G. P.: *Study on flow and heat transfer characteristics of heat pipe with axial “Ω”-shaped microgrooves*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009), Nr. 3, S. 636–643
- [#170] LÓPEZ-MUÑOZ, Gerardo A. ; BALDERAS-LÓPEZ, José Abraham ; ORTEGA-LOPEZ, Jaime ; PESCADOR-ROJAS, José A. ; SALAZAR, Jaime Santoyo: *Thermal diffusivity measurement for urchin-like gold nanofluids with different solvents, sizes and concentrations/shapes*. In: *Nanoscale research letters* 7 (2012), Nr. 667, S. 1–7
- [#171] LU, Ming-Chang ; HUANG, Chien-Hsung: *Specific heat capacity of molten salt-based alumina nanofluid*. In: *Nanoscale research letters* 8 (2013), Nr. 292, S. 1–7
- [#172] CHERUZZI, Manila ; CERRITELLI, Gian F. ; MILIOZZI, Adio ; KENNY, José M.: *Effect of nanoparticles on heat capacity of nanofluids based on molten salts as PCM for thermal energy storage*. In: *Nanoscale research letters* 8 (2013), Nr. 448, S. 1–9
- [#173] BRANSON, Blake T. ; BEAUCHAMP, Paul S. ; BEAM, Jeremiah C. ; LUKEHART, Charles M. ; DAVIDSON, Jim L.: *Nanodiamond nanofluids for enhanced thermal conductivity*. In: *ACS nano* 7 (2013), Nr. 4, S. 3183–3189
- [#176] ORTEGEL, Harald: *Heiß und Kalt für Qualität und Zykluszeit : Wechseltemperierung beim Spritzgießen*. In: *Plastverarbeiter* 2013 (2013), Nr. 03. URL <http://www.plastverarbeiter.de/texte/anzeigen/14483/Heiss-und-Kalt-fuer-Qualitaet-und-Zykluszeit> – Überprüfungsdatum 2013-12-28
- [#179] RASCHKE, Florian ; GIESSAUF, Josef ; STEINBICHLER, Georg: *Versteckte Potenziale heben*. In: *Kunststoffe* (2011), Nr. 11, S. 41–44
- [#181] YANG, X. ; YAN, Y. Y. ; MULLEN, D.: *Recent developments of lightweight, high performance heat pipes*. In: *Applied Thermal Engineering* 33-34 (2012), S. 1–14
- [#183] CORSON, Francis: *Fluctuations and redundancy in optimal transport networks*. In: *Physical review letters* 104 (2009), S. 048703 (1-4)
- [#184] MEHRALI, Mohammad ; SADEGHINEZHAD, Emad ; LATIBARI, Sara Tahan ; KAZI, Salim Newaz ; MEHRALI, Mehdi ; ZUBIR, Mohd Nashrul ; METSELAAR, Hendrik Simon: *Investigation of thermal conductivity and rheological properties of nanofluids containing graphene nanoplatelets*. In: *Nanoscale research letters* 9 (2014), Nr. 15, S. 1–12
- [#185] TENG, Tun-Ping ; HUNG, Yi-Hsuan ; TENG, Tun-Chien ; CHEN, Jyun-Hong: *Performance evaluation on an air-cooled heat exchanger for alumina nanofluid under laminar flow*. In: *Nanoscale research letters* 6 (2011), Nr. 1, S. 488
- [#188] ELNAJJAR, Emad ; HAMDAN, Mohammad O. ; HAİK, Yousef: *Experimental Investigation of Internal Channel Cooling Via Jet Impingement*. In: *FDMP: Fluid Dynamics & Materials Processing* 9 (2013), Nr. 1, S. 77–89

- [#189] AL-RJOUN, Marwan F. ; ROY, Ajit K. ; GANGULI, Sabyasachi ; BANERJEE, Rupak K.: *Assessment of an active-cooling micro-channel heat sink device, using electro-osmotic flow*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54 (2011), Nr. 21, S. 4560–4569
- [#191] GORLA, Rama S.R. ; CHAMKHA, Ali ; ALORAIEB, Abdulkareem: *Melting heat transfer in a nanofluid flow past a permeable continuous moving surface*. In: *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering* 8 (2011), Nr. 2
- [#192] HOSSEINI, SEIYED MOHAMMAD JAVAD ; RANJBAR, Ali Akbar ; SEDIGHI, Kourosh ; RAHIMI, Masoumeh: *Melting of Nanoparticle-Enhanced Phase Change Material inside Shell and Tube Heat Exchanger*. In: *Journal of Engineering* 2013 (2013), Nr. 17, S. 1–8
- [#194] EL HASADI, YOUSEF M. F. ; KHODADADI, J. M.: *Numerical Simulation of the Effect of the Size of Suspensions on the Solidification Process of Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials*. In: *Journal of Heat Transfer* 135 (2013), S. 052901-1 - 052901- 11
- [#200] HEYNING, J. E.: *Thermoregulation in the Mouths of Feeding Gray Whales*. In: *Science* 278 (1997), Nr. 5340, S. 1138–1140
- [#201] DIRKS, Jan-Henning ; LI, MingHe ; KABLA, Alexandre ; FEDERLE, Walter: *In vivo dynamics of the internal fibrous structure in smooth adhesive pads of insects*. In: *Acta Biomaterialia* 8 (2012), Nr. 7, S. 2730–2736
- [#205] JIA, W. ; QIU, H.-H.: *Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling*. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 27 (2003), Nr. 7, S. 829–838
- [#206] TERO, A. ; TAKAGI, S. ; SAIGUSA, T. ; ITO, K. ; BEBBER, D. P. ; FRICKER, M. D. ; YUMIKI, K. ; KOBAYASHI, R. ; NAKAGAKI, T.: *Rules for biologically inspired adaptive network design*. In: *Science* 327 (2010), Nr. 5964, S. 439–442
- [#207] OWHAIB, Wahib ; PALM, Björn: *Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels*. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 28 (2004), 2-3, S. 105–110
- [#208] SEEBACHER, F.: *Heat Transfer in a microvascular network: the effect of heart rate on heating and cooling in reptiles (Pogona barbata and Varanus varius)*. In: *Journal of Theoretical Biology* 203 (2000), Nr. 2, S. 97–109
- [#209] THOMAS, D. B. ; KSEPKA, D. T. ; FORDYCE, R. E.: *Penguin heat-retention structures evolved in a greenhouse Earth*. In: *Biology Letters* 7 (2011), Nr. 3, S. 461–464
- [#210] KHALED, A.-R.A. ; VAFAI, K.: *The role of porous media in modeling flow and heat transfer in biological tissues*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46 (2003), Nr. 26, S. 4989–5003
- [#213] DEB, Sugato ; YAO, S.-C.: *Analysis on film boiling heat transfer of impacting sprays*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 32 (1989), Nr. 11, S. 2099–2112
- [#214] ROY, Gilles ; NGUYEN, Cong Tam ; LAJOIE, Paul-René: *Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a radial flow cooling system with the use of nanofluids*. In: *Superlattices and Microstructures* 35 (2004), 3-6, S. 497–511
- [#215] XU, Peng ; BOMING, Yu ; MEIJUAN, Yum ; MINGQING, ZOU: *Heat conduction in fractal tree-like branched networks*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006), 19-20, S. 3746–3751
- [#216] MOOIBROEK, Jaap ; LAGENDIJK, Jan J. W.: *A fast and simple algorithm for the calculation of convective heat transfer by large vessels in three-dimensional inhomogeneous tissues*. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 38 (1991), Nr. 5, S. 490–501
- [#217] GOWRISHANKAR, T. R. ; STEWART, Donald A. ; MARTIN, Gregory T. ; WEAVER, James C.: *Transport lattice models of heat transport in skin with spatially heterogeneous, temperature-dependent perfusion*. In: *BioMedical Engineering OnLine* 42 (2004), Nr. 3, S. 1–17. URL <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/3/1/42> – Überprüfungsdatum 2015-09-01
- [#218] HU, Dan ; CAI, David ; RANGAN, Aaditya V.: *Blood vessel adaptation with fluctuations in capillary flow distribution*. In: *PLoS ONE* 7 (2012), Nr. 9, S. e45444
- [#220] BALANDIN, Alexander A. ; GHOSH, Suchismita ; BAO, Wenzhong ; CALIZO, Irene ; TEWELDEBRHAN, Desalegne ; MIAO, Feng ; NING LAU, Chun: *Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene*. In: *Nano Letters* 8 (2008), Nr. 3, S. 902–907
- [#221] MA, Wenshi ; YANG, Fang ; SHI, Jingjing ; WANG, Fuxian ; ZHANG, Zhengguo ; WANG, Shuangfeng: *Silicone based nanofluids containing functionalized graphene nanosheets*. In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 431 (2013), S. 120–126

- [#222] SURESH, S. ; VENKITARAJ, K. P. ; SELVAKUMAR, P. ; CHANDRASEKAR, M.: *Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer*. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 38 (2012), S. 54–60
- [#223] CHEN, Lifei ; XIE, Huaqing: *Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement*. In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (2009), Nr. 352, S. 136–140
- [#224] YI, W. ; LU, L. ; DIAN-LIN, Zhang ; PAN, Z. ; XIE, S.: *Linear specific heat of carbon nanotubes*. In: *Physical Review B* 59 (1999), Nr. 14, S. R9015-R9018
- [#225] DING, Yulong ; ALIAS, Hajar ; WEN, Dongsheng ; WILLIAMS, Richard A.: *Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006), 1-2, S. 240–250
- [#226] BERBER, Savas ; KWON, Young-Kyun ; TOMÁNEK, David: *Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes*. In: *Physical review letters* 84 (2000), Nr. 20, S. 4613–4616
- [#227] PIROMPUGD, Worachest ; WONGWISES, Somchai ; WANG, Chi-Chuan: *Simultaneous heat and mass transfer characteristics for wavy fin-and-tube heat exchangers under dehumidifying conditions*. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006), 1-2, S. 132–143
- [#230] YANG, Xin-She: *Modelling heat transfer of carbon nanotubes*. In: *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 13 (2005), S. 893–902
- [#232] SERGIS, Antonis ; HARDALUPAS, Yannis: *Anomalous heat transfer modes of nanofluids: a review based on statistical analysis*. In: *Nanoscale research letters* 6 (2011), Nr. 1, S. 391
- [#235] CHOI, Stephen U. S. ; EASTMAN, J. A.: *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*. In: *ASME* (1995), Nr. 231, S. 99–105. URL [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/27/043/27043758.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/043/27043758.pdf) – Überprüfungsdatum 2014-06-28
- [#236] BAUDINETTE, R. V. ; LOVERIDGE, J. P. ; WILSON K. J. ; MILLS, C. D., SCHMIDT-NIELSEN, K.: *Heat loss from feet of herring gulls at rest and during flight*. In: *American Journal of Physiology* 230 (1976), Nr. 4, S. 920–924
- [#237] BAKER, Mary Ann ; HAYWARD, James N.: *The influence of the nasal mucosa nad the carotid rete upon hypothalamic temperature in sheep*. In: *Journal of Physiology* 198 (1968), S. 561–579
- [#238] BUONGIORNO, J.: *Convective Transport in Nanofluids*. In: *Journal of Heat Transfer* 128 (2005), Nr. 3, S. 240–250
- [#239] KOOPS, Kathelijne ; MCGREW, William C. ; VRIES, Han ; MATSUZAWA, Tetsuro: *Nest-building by chimpanzees (Pan troglodytes verus) at Seringbara, Nimba Mountains: antipredation, thermoregulation, and antivector hypotheses*. In: *International Journal of Primatology* 33 (2012), Nr. 2, S. 356–380
- [#240] THOMAS, Daniel B. ; FORDYCE, R. Ewan: *The heterothermic loophole exploited by penguins*. In: *Australian Journal of Zoology* 55 (2007), Nr. 5, S. 317–321
- [#241] MIDTGÅRD, Uffe: *The Rete tibiotarsale and Arteriovenous Association in the Hind Limb of Birds: A Comparative Morphological Study on Counter-current Heat Exchange Systems*. In: *Acta Zoologica* 62 (1981), Nr. 2, S. 67–87
- [#242] SHADWICK, R. E.: *Mechanical design in arteries*. In: *The Journal of Experimental Biology* 202 (1999), S. 3305–3313
- [#243] SCHMIDT-NIELSEN, K. ; SCHROTER, R. C. ; SHKOLNIK, A.: *Desaturation of exhaled air in camels*. In: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 211 (1981), Nr. 1184, S. 305–319
- [#244] WOLPERT, Arlen: *Heat transfer analysis of factors affecting Plant leaf Temperature. Significance of leaf hair*. In: *Plant Physiology* 37 (1962), Nr. 2. URL <http://www.plantphysiol.org/content/37/2/113.full.pdf> – Überprüfungsdatum 2015-02-25
- [#250] OCKO, Samuel A. ; MAHADEVAN, L.: *Collective thermoregulation in bee clusters*. In: *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society* 11 (2014), Nr. 91, S. 1–14
- [#253] BARRETT, Thomas R. ; ROBINSON, S. ; FLINDERS, K. ; SERGIS, A. ; HARDALUPAS, Y.: *Investigating the use of nanofluids to improve high heat flux cooling systems*. In: *Fusion Engineering and Design* 88 (2013), 9-10, S. 2594–2597

- [#255] BLIX, Arnoldus Schytte ; WALLØE, Lars ; FOLKOW, Lars P.: *Regulation of brain temperature in winter-acclimatized reindeer under heat stress*. In: *The Journal of Experimental Biology* 214 (2011), Pt 22, S. 3850–3856
- [#256] COPPOLA, G. ; CARO, C.: *Oxygen mass transfer in a model three-dimensional artery*. In: *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society* 5 (2008), Nr. 26, S. 1067–1075
- [#257] COOPER, C. E.: *Biophysical properties of the pelt of a diurnal marsupial, the numbat (Myrmecobius fasciatus), and its role in thermoregulation*. In: *Journal of Experimental Biology* 206 (2003), Nr. 16, S. 2771–2777

## Patentschrift

- [#060] GRUNDMANN, Jörn ; KUMMETH, Peter ; NICK, Wolfgang ; VAN HABELT, Peter: *Kühleinrichtung mit dochtartigem Material zum Transport von Kühlmittel*. Siemens AG. Anmeldenr. 10 2011 079 968.0, Deutschland. 31.01.2013. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102011079968A1. IPC F25B 41/00
- [#061] DUVAL, Jean: *Zweiphasige Wärmeaustauschvorrichtung*. Atmosstat Etudes et Recherches. Anmeldenr. 99 910 447.4, Frankreich. 22.07.2004. Frankreich. Veröffentlichungsnr. DE000069910996T2. IPC F28D 15/02
- [#062] DENNER, Wolf-Jürgen ; WOLF, Jürgen ; LORENZEN, Dirk: *Kapillare Verdampferstruktur und Kühlsystem*. Fachhochschule Jena. Anmeldenr. 103 01 873.5, Deutschland. 20.04.2006. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000010301873B4. IPC F28D 15/04
- [#076] FAN, Zhongyun ; Ji, Shouxun ; BEVIS, John: *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Metall-Legierungs-Gussteilen*. Brunel University. Anmeldenr. 601 07 690.7, Great Britain. 15.12.2005. Great Britain. Veröffentlichungsnr. DE000060107690T2. IPC B22D 11/112
- [#083] SICRE, Benoit ; OLTERSODORF, Thore ; HERMANN, Michael: *Fluidverteilungselement für eine fluidführende Vorrichtung*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE. Anmeldenr. 10 2007 056 995 .7, Deutschland. 28.05.2009. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 10 2007 056 995 A1. IPC F16L 9/19
- [#084] BENIGNOS, Jorge Alejandro Carretero ; ERDMENGER, Rodrigo Rodriguez ; LEONE, Sal Albert ; TAYLOR, Thomas Francis ; ZHANG, Hua ; ECKSTEIN, Johannes: *Rippenrohr-Wärmetauscher*. General Electric Co., Schenectady, N.Y., US. Anmeldenr. 10 2010 016 544.1, Deutschland. 11.11.2010. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 10 2010 016 544 A1. IPC F28F 1/36
- [#085] AMBORN, Gerhard ; CHAHED, Bechir ; SCHOLZ, Klaus ; HOFFMANN, Matthias ; MALSCH, Enrico: *Wärmetauscher*. GSP Lüftungstechnik GmbH, 36433 Immelborn, DE. Anmeldenr. 102009 043 308.2, Deutschland. 31.03.2011. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 10 2009 043 308 A1. IPC F28F 21/06
- [#086] SCHEHR, Ingo: *Wärmetauscher-Lamellenmodul, Wämetauscher und elektrisches Heizmodul*. Schehr, Ingo. Anmeldenr. 10 2010 033 309.3, Deutschland. 09.02.2012. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 10 2010 033 309 A1. IPC F28F 3/02
- [#087] STEINMANN, Wolf-Dieter: *Verfahren zur Übertragung von Wärme und Wärmeübertragungssystem*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., 51147, Köln, DE. Anmeldenr. 10 2011 053 347.8, Deutschland. 07.03.2013. Deutschland. IPC F24J 2/00
- [#088] GERGES, Ihab Edward ; EVANS, Bruce ; BURGERS, John ; MARTIN, MICHAEL A., HAMILTON: *Mit Rippen versehener, zylindrischer Wärmetauscher*. Dana Canada Corp., Oakville, Ontario, CA. Anmeldenr. 11 2010 000 761.6, Deutschland. 22.07.2010. Deutschland. Veröffentlichungsnr. De 11 2010 000 761 T5. IPC F28D 7/10
- [#089] HERMANN, Michael: *Verfahren zur Erstellung eines Hydrauliknetzwerkes für einen optimierten Wärmeübertragungs- und Stofftransport*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE. Anmeldenr. 103 19 367.7, Deutschland. 25.11.2004. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 103 19 367 A1. IPC F17D 1/08
- [#090] STEMKE, Lothar: *Kühlmittelverteilung zur Werkzeugkühlung*. 16.02.2011. Veröffentlichungsnr. DE 102008000452. IPC EP 2 282 880 B1
- [#091] VOLKER, Wolfgang: *Verfahren und Vorrichtung zur Werkzeugkühlung*. Messer Griesheim GmbH, 65933 Frankfurt DE. Anmeldenr. 102 56 036.6, Deutschland. 17.06.2004. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 102 56 036 A1. IPC B29C 33/04
- [#092] BUSSE, Jügen ; DREMELJI, Andrej ; GROBELNIK, Bernard ; RUSE, S. L. ; GÜNTER, Kamnica: *Verfahren zur Werkzeugkühlung von Indirekt-Leichtmetall-Strangpressen mit flüssigem Stickstoff*. Messer Griesheim GmbH,

- 65933 Frankfurt, DE; Messer Slovenija d.o.o., Ruée, SI. Anmeldenr. 198 57 790.7, Deutschland. 20.07.2000. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 198 57 790 A1. IPC B21 C 29/00
- [#093] LIN, Chih-miao: *Verbesserung einer Werkzeugkühlung und deren Dichtung*. Anmeldenr. 298 03 398.4, Deutschland. 14.05.1998. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 298 03 398 U1
- [#100] THOMAS, Brian G. ; BENTSMAN, Joseph. ; ZHENG, Kal: *Cooling control system for continuous casting of metal*. Anmeldenr. 13/467,709, USA. 21.03.2013. USA. Veröffentlichungsnr. US020130068416A1. IPC B22D11/22
- [#101] BERGHEIM, Silke ; VOLKER, Wolfgang ; POLOCZEK, Thaddäus: *Verfahren zur Kühlung von Formwerkzeugen bei der Herstellung von Kunststoff-Spritzgussteilen*. Messer Griesheim GmbH. Anmeldenr. DE 33 22 312 A1, Deutschland. 03.07.2003. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000010160903A1. IPC B29C45/73
- [#102] DEMOTS, Anthony Bernard ; STYLES, Martin James: *Luft-Flüssigkeits-Wärmetauscher*. Ford Global Technologies. Anmeldenr. 1204677.7, USA. 10.10.2013. USA. Veröffentlichungsnr. DE102013205267A1. IPC F28D1/03
- [#103] MARTI, Heinrich: *Verfahren zur Nutzung von Wärmeenergien, vorzugsweise bei einer Stranggiessanlage*. Heinrich Marti, Deutschland. 31.01.2013. Deutschland. Veröffentlichungsnr. WO002013013788A1. IPC B22D11/055, /124, und /22
- [#104] PLOCIENNIC, Uwe ; WITTERSTEIN, Claus ; HOVESTÄDT, Erich ; REIFFERSCHIED, Markus ; MROCKOWSKI, Klaus: *Wärmetauscher*. SMS Siemag AG. Anmeldenr. 10 2012 211 574.9, Deutschland. 11.07.2013. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102012211574A1. IPC F27D17/00
- [#105] WARD, Gary C.: *Formwerkzeugkühlmittelsystem mit einer integralen und automatischen Leckprüfung*. GM Global Technology Operations. Anmeldenr. 10 2013 200 042.1, USA. 11.07.2013. USA. Veröffentlichungsnr. DE102013200042A1. IPC B22D 17/22
- [#126] BAUMANN, Frithjof ; VÖLKE, Dietmar: *Formen und Werkzeuge mit einem feingliedrig verzweigten Temperierkanalnetzwerk, ihre Formen und Werkzeuge mit einem feingliedrig verzweigten Temperierkanalnetzwerk, ihre Verwendung und Verfahren zur Temperierung von Formen und Werkzeugen*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung E.V. Anmeldenr. 98102019.1, Deutschland. 12.08.1998. Deutschland. Veröffentlichungsnr. EP 0 857 554 A2. IPC B29C 33/04
- [#131] SCHMETZ, Klaus: *Formkern zur Formkörperherstellung und Verfahren zu seiner Herstellung*. Innova Zug AG, Zug, CH. Anmeldenr. 4408707, Deutschland. 21.09.1995. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 44 08 707 A1. IPC B29 C 45/73
- [#132] FAHRBACH, Karl-Heinz ; EBERHARDT, Herbert ; FÖLSTER, Alfred: *Aus Kunststoff bestehende Folientiefziehform*. Daimler-Benz AG, 7000 Stuttgart, DE. Anmeldenr. 31 03 890.5-16, Deutschland. 11.11.1982. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 31 03 890 C1. IPC B 29 C 17/03
- [#134] BRUNNER, Winfried ; DEDERRA, Helmut: *Preßformhälfte, insbesondere zur Herstellung von Schalplatten*. Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, 8000 München. Anmeldenr. 29 19 683, Deutschland. 20.11.1980. Deutschland. Veröffentlichungsnr. 29 19 683. IPC B 29 C 1/00
- [#136] HUY, Hans-Peter: *Vorrichtung zum Gießen von Gußeisen in einer Kokille*. Huppert Engineering GmbH & Co. KG. Anmeldenr. 10 2010 035 440.6, Deutschland. 12.04.2012. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102010035440B4\_all\_pages. IPC B22D 15/04 (2006.01)
- [#144] LICHT, Jürgen ; HAGEL, Hubert ; LEICHT, Franz: *Verfahren zur beschleunigten Abkühlung von Gußstücken*. Albert Handtmann Metallgusswerk. Anmeldenr. 10 2007 048 419.6, Deutschland. 18.06.2009. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102007048419B3. IPC B22D 15/04(2006.01)
- [#159] CHIMANI, C. ; DANOV, V. ; GROMOLL, B. ; HAHN, S. ; GERHARD: *Wärmerückgewinnung und Überhitzungsabbau einer Metallschmelze bei einem Stranggießverfahren*. Siemens Aktiengesellschaft. Anmeldenr. 10 2009 051 132.6, Deutschland. 25.07.2013. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102009051132B4. IPC B 22 D 11/ 055
- [#160] CHIMANI, C. ; DANOV, V. ; GROMOLL, B. ; HAHN, S. ; MATSCHULLAT, T.: *Wärmerückgewinnung und Vergleichmäßigung der Wärmeabfuhr mit Hilfe von Thermosyphons oder Heat-Pipes in den Wänden einer Kokille einer Stranggießanlage*. Siemens Aktiengesellschaft. Anmeldenr. 10 2009 051 134.2, Deutschland. 25.07.2013. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102009051134B4. IPC B 22 D 11/055
- [#167] PANZER, Udo: *Handwerkzeugmaschine und Verfahren zur Luftkühlung eines Antriebsmotors einer Handwerkzeugmaschine*. Flex-Elektrowerkzeuge GmbH, Deutschland. 24.05.2006. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102004056679. IPC B25F5/00; B25F5/02

- [#168] HOFFMEISTER, Jörn ; VOGL, Norbert ; HEMMERLE, Jürgen ; MOBNER, Wolfgang ; BECKER, Martin ; REIFFERSCHIED, Markus: *Platte mit Kühlkanälen*. SMS Siemens AG. Anmeldenr. DE102009060240, Deutschland. 30.06.2011. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE102009060240. IPC B22D11/055
- [#169] WU, Alan Ka-Ming ; MARTIN, Michael A.: *Wärmetauscher mit Seitenplatten-Oberflächenkühlung*. Dana Canada Corp., Oakville, Ontario, CA. Anmeldenr. F28D 1/03, USA. 04.05.2006. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 11 2004 000 481 T5
- [#180] LINKE, Gerd ; LUDWIG, Peter: *Verfahren zur Konfigurierung eines an eine Gießform angepaßten Sprühsystems zur Kühlung der Gießform*. DaimlerChrysler AG. Anmeldenr. 103 09 930.1, Deutschland. 23.09.2004. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE000010309930A1. IPC B22D17/20; B22D17/32
- [#219] OLSON, Jeffrey R.: *System Apparatus and Method for micro-capillary heat exchanger*. Lockheed Martin Corporation. Anmeldenr. 61/647.198, USA. 21.11.2013. USA. Veröffentlichungsnr. US 2013/0306279 A1
- [#228] LARSSON, Owe: *Verfahren zum Härten eines Formwerkzeuges*. AGA AB, SE. Anmeldenr. 69206405, DE. Veröffentlichungsnr. DE 692 06 405 T2
- [#233] FELDHAUS, Stephan ; FRIEDRICH, Jürgen ; KOPFSTEDT, Uwe ; PARSCHE, Lothar ; PLESCHIUTSCHNIGG, Fritz-Peter ; RAHMFELD, Werner ; STALLEICKEN, Dieter ; VONDERBANK, Michael ; WEYER, Axel ; WOSCH, Erwin: *Verfahren und Vorrichtung zur thermischen Kontrolle einer Stranggießkokille*. SMS Demag AG. Anmeldenr. 10116514, DE. 24.01.2002. DE. Veröffentlichungsnr. DE000010116514A1
- [#234] BALDUHN, Reinhard: *Verfahren und Vorrichtung zum Strangguß von Rohren oder Hohlknüppeln aus Metall sowie zur Energierückgewinnung*. Dr.-Ing. Balduhn Reinhard. Anmeldenr. 3505417, DE

## Hochschulschrift

- [#36] HERMANN, Michael: *Bionische Ansätze zur Entwicklung energieeffizienter Fluidsysteme für den Wärmetransport*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau. Dissertation. 2005
- [#187] MCGLYNN, D'Arcy: *Model Development For Micro-Channel Cooling Technology*. Waterloo, Ontario, Canada, University of Waterloo. Master Thesis
- [#190] MARTINEZ, Christian David: *Heat transfer enhancement of spray cooling with nanofluids*. University of South Florida. Master Thesis. 2009-01-01

## Buch (Monographie)

- [#001] NACHTIGALL, Werner: *Biologisches Design : Systematischer Katalog für bionisches Gestalten*. Berlin [u.a.] : Springer, 2005
- [#008] PURVES, William K. ; SADAVA, David E. ; HILLIS, David M.: *Biologie*. 9. Aufl. Heidelberg : Spektrum Akad. Verl, 2011
- [#011] YAHYA, Hârûn ; CLARKE, Abdassamad: *Design in nature*. London : Ta-Ha Pulishers Ltd., 2002
- [#014] TRIBUTSCH, Helmut: *How life learned to live : Adaptation in nature*. [2nd pr.]. Cambridge, Massachusetts [etc.] : The MIT Press, 1984
- [#009] NULTSCH, Wilhelm: *Allgemeine Botanik*. 11., völlig Neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart [u.a.] : Thieme, 2001

## Graue Literatur / Bericht / Report

- [#007] SAEWERT, H.-C. ; LUBACZOWSKI, G. ; ALIYEV, R. ; GUNDLACH, J. ; HONSEL, C. ; ROTH, S. ; SCHOLZ, H.-W. ; MANETSBERGER, K. ; BEHM, I. ; PRECHTL, M.: *WESPRO - Intelligente Werkzeuge für die Erzeugung seriennaher metallischer Prototypen und Kleinserien für das Druck- und Kokillengießen : Verbundprojekt ; Ergebnisbericht ; [Laufzeit: 01.03.2001 - 30.06.2004 ]*. Hannover, [Wolfsburg] [u.a.]
- [#010] HERMANN, Michael: *FracTherm ® Sonnenkollektoren und Wärmetauscher mit optimierten Strömungskanälen*
- [#161] TZANOVA, Slavka ; KAMENOVA, Lora ; AVENAS, Yvan ; SCHAEFFER, Ch: *Evaluation of the thermal and hydraulic performances of a very thin sintered copper flat heat pipe for 3D microsystem packages*
- [#186] MIKESKA, Tomas ; SVENDSEN, Svend: *Heating and cooling with capillary micro tubes integrated in a thin-shale concrete sandwich element*
- [#252] RENDI, A. S. ; SUPRIJADI ; VIRIDI, S.: *Modeling of blood vessel constriction in 2-D case using molecular dynamics method*

## Internetdokument

- [#133] *Blood flow regulates heat exchange: alligator.* URL <http://www.asknature.org/strategy/cab0c9f9b27d7c2c8d63c0451c6400a7> – Überprüfungsdatum 2013-11-22
- [#119] *Flower creates heat: philodendron.* URL <http://www.asknature.org/strategy/f901c776c8df9a7fd076f96febdf6eba> – Überprüfungsdatum 2013-11-16
- [#028] *Grey Heron Chick - Gular Fluttering.avi.* URL <http://www.youtube.com/watch?v=U8WDMQNrB-s>. – Aktualisierungsdatum: 2013-09-27 – Überprüfungsdatum 2013-09-27
- [#124] *Gular fluttering dissipates heat: nightjars.* URL <http://www.asknature.org/strategy/df479edb10713dec0097de25edf20b80> – Überprüfungsdatum 2013-11-16
- [#123] *Managing high temperatures: tenrecs.* URL <http://www.asknature.org/strategy/23602244a4d66744302a624b8cde785a> – Überprüfungsdatum 2013-11-16
- [#129] *Mechanisms help thermoregulation: bumblebees.* URL <http://www.asknature.org/strategy/4c4069119506292fdd3fb0f96be4caa3> – Überprüfungsdatum 2013-11-21
- [#118] *Mound passively heats/cool: compass termite.* URL <http://www.asknature.org/strategy/0b6de7e76091446430d275b2c52473dd> – Überprüfungsdatum 2013-11-16
- [#122] *Pouch dissipates heat: pelican.* URL <http://www.asknature.org/strategy/efa4275feb8eb32d97ee90048af70685> – Überprüfungsdatum 2013-11-16
- [#006] PRODUKTIONSFORSCHUNG: *Verbundprojekt WESPRO.* URL [http://www.produktionsforschung.de/PFT/verbundprojekte/vp/index.htm?VP\\_ID=563](http://www.produktionsforschung.de/PFT/verbundprojekte/vp/index.htm?VP_ID=563). – Aktualisierungsdatum: 2013-09-24 – Überprüfungsdatum 2013-09-24
- [#31] ATTENBOROUGH, David: *How the quiver tree survives in the desert - David Attenborough - BBC wildlife.* URL <http://www.youtube.com/watch?v=A6L3korqXb4>. – Aktualisierungsdatum: 2013-09-28 – Überprüfungsdatum 2013-09-28
- [#114] *BBC - Earth News - Starfish 'pump up' to cool down.* URL [http://news.bbc.co.uk/earth/hi/earth\\_news/newsid\\_8328000/8328311.stm](http://news.bbc.co.uk/earth/hi/earth_news/newsid_8328000/8328311.stm) – Überprüfungsdatum 2013-11-16
- [#128] R. EWAN FORDYCE, DANIEL B. THOMAS: *Wings reduce heat loss: penguin : Wings of penguins reduce heat loss by forming a countercurrent heat exchanger via the vascular design.* URL <http://www.asknature.org/strategy/740c420618b1b9abb92630cdaff6e0dd> – Überprüfungsdatum 2013-11-21
- [#130] *Deep divers manage temperature: beaked whales : Veins and arteries of Vuvier's beaked whales manage heat through different configurations of counter-current heat exchangers.* URL <http://www.asknature.org/strategy/3574bf7af3ea37050a87474b4c66d1dc> – Überprüfungsdatum 2013-11-21
- [#148] CHIAVAZZO, Eliodoro ; ASINARI, Pietro: *Enhancing heat transfer in nanofluids by carbon nanofins.* URL <http://arxiv.org/abs/1011.4007> – Überprüfungsdatum 2015-09-02
- [#127] E. NORBERT SMITH: *JSTOR: Physiological Zoology, Vol. 49, No. 1 (Jan., 1976), pp. 37-48.* URL <http://www.jstor.org/discover/10.2307/30155675?uid=3737528&uid=2&uid=4&sid=21102973491641> – Überprüfungsdatum 2013-11-21
- [#182] S. BOUNDS, G. MORAN, K. PERILEOUS, M. CROSS, T. N. CROFT: *A computational model for defect prediction in shape castings based on the interaction of free surface flow, heat transfer, and solidification phenomena - Springer.* URL <http://link.springer.com/article/10.1007/s11663-000-0157-1#page-2> – Überprüfungsdatum 2014-01-10
- [#203] *Boiling Heat Transfer and Droplet Spreading of Nanofluids | BenthamScience.* URL <http://www.eurekaselect.com/118358/article> – Überprüfungsdatum 2014-02-12

Anhang A4: Literatur nach Kategorien

Bewertung in Sternen nach Wichtigkeit für das Projekt; # Nr bezieht sich auf die eindeutige Laufnummer im Programm Citavi

| Bereich    | Gebiet         | Thema                | Fokus                        | Literatur (inkl. Bewertung)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Bild                                                                                  | Bild-Quelle |
|------------|----------------|----------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1 Biologie | 1.1 Allgemein  |                      |                              | Biologisches Design - Systematischer Katalog für bionisches Gestalten (#1) ★★★★★<br>Biologie (#8) ★★★★★<br>Allgemeine Botanik (#9) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                       |             |
|            | 1.2 Art        | 1.2.1 Pilze          | 1.2.1.1 Schleimpilz          | Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design (#206) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    | #206 / S. 3 |
|            |                | 1.2.2 Botanik        | 1.2.2.1 Blätter              | Fluctuations and redundancy in optimal transport networks (#183) ★★★★★<br>Damage and fluctuations induce loops in optimal transport networks (#138) ★★★★★<br>Das Blattadersystem der Angiospermen: Form und Evolution (#37) ★★★★★<br>The role of elastic stresses on leaf venation morphogenesis (#137) ★★★★★<br>Insect eggs protected from high temperatures by limited homeothermy of plant leaves (#20) ★★★★★ |    | 3           |
|            |                |                      | 1.2.2.2 Köcherbaum           | How the quiver tree survives in the desert (#31) ★☆☆☆☆                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                       |             |
|            |                |                      | 1.2.2.3 Philodendron selloum | Flower creates heat: philodendron (#119) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                       |             |
|            |                |                      | 1.2.2.4 Sacred Lotus         | Contribution to Respiration during thermogenesis in Flowers of the Sacred Lotus (#120) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                       |             |
|            | 1.2.3 Zoologie | 1.2.3.1 Aye Aye      |                              | Thermal Imaging of Aye-Ayes (Daubentonia madagascariensis) (#117) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                       |             |
|            |                | 1.2.3.2 Alligatoren  |                              | Blood flow regulates heat exchange: alligator (#133) ★★★★★<br>Interaction between temperature and hypoxia in the alligator (#29) ★★★★★<br>Physiological Zoology: alligator (#127) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                          |  | 6           |
|            |                | 1.2.3.3 Antilopen    |                              | Heat storage in running antelopes: independence of brain and body temperatures (#32) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                       |             |
|            |                | 1.2.3.4 Delphine     |                              | Thermoregulation of the intra-abdominal testes of the bottlenose dolphin during exercise (#48) ★★★★★<br>Temperature regulation of the testes of the bottlenose dolphin (Tursiops truncatus) (#68) ★★★★★                                                                                                                                                                                                          |  | 8           |
|            |                | 1.2.3.5 Elefanten    |                              | The contribution of nasal countercurrent heat exchange in the northern elephant seal (#63) ★★★★★<br>What is the use of elephant hair? (#95) ★★★★★<br>Heat exchange by the pinna of the African elephant (Loxodonta africana) (#98) ★★★★★<br>Taking the heat: thermoregulation in Asian elephants under different climatic conditions (#96) ★★★★★                                                                 |  |             |
|            |                | 1.2.3.6 Fledermäuse  |                              | Thermoregulation and roost selection by reproductive female big brown bats (#113) ★★★★★<br>Thermal windows on Brazilian free-tailed bats facilitate thermoregulation (#19) ★★★★★<br>Thermoregulation during Flight: Body Temperature and Sensible Heat Transfer (#18) ★★★★★<br>Interspecific variation in thermoregulation among three sympatric bats (#110) ★★★★★                                               |  | #19 / S. 3  |
|            |                | 1.2.3.7 Flossenfüßer |                              | Anatomy of the hind flippers of two species of seals with reference to thermoregulation (#135) ★★★★★<br>Skin histology and its role in heat dissipation in three pinniped species (#97) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                    |  | 10          |
|            |                | 1.2.3.8 Geier        |                              | Thermoregulation in turkey vultures (#52) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | 11          |
|            |                | 1.2.3.9 Gepard       |                              | Temperature regulation in running cheetah: a strategy for sprinters (#33) ★★★★★                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                       |             |
|            |                | 1.2.3.10 Giraffe     |                              | Pressure profile and morphology of the arteries along the giraffe limb (#109) ★★★★★<br>Blood pressure and flow rate in the giraffe jugular vein (#39) ★★★★★<br>Giraffe Thermoregulation (#145) ★★★★★                                                                                                                                                                                                             |                                                                                       | #145 / S. 4 |









|  |  |     |                                                                                                   |                                                                                     |             |
|--|--|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|  |  | >>> | Verfahren zur beschleunigten Abkühlung von Gußstücken (#144) ★★★★★                                |                                                                                     | #144 / S. 4 |
|  |  | >>> | Verbesserung einer Werkzeugkühlung und deren Dichtung (#93) ★★★★★                                 |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Handwerkzeugmaschine und Luftkühlung eines Antriebsmotors einer Handwerkzeugmaschine (#167) ★☆☆☆☆ |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Wärmetauscher (#104) ★☆☆☆☆                                                                        |  |             |
|  |  | >>> | Wärmetauscher-Lamellenmodul, Wärmetauscher und elektrisches Heizmodul (#86) ★★★★★                 |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Formkern zur Formkörperherstellung und Verfahren zu seiner Herstellung (#131) ★★★★★               |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Fluidverteilungselement für eine fluidführende Vorrichtung (#83) ★★★★★                            |                                                                                     | #83 / S. 16 |
|  |  | >>> | Verfahren zur Übertragung von Wärme und Wärmeübertragungssystem (#87) ★★★★★                       |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Kühlmittelverteilung zur Werkzeugkühlung (#90) ★★★★★                                              |  | #90 / S. 6  |
|  |  | >>> | Cooling control system for continuous casting of metal (#100) ★★★★★                               |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Verfahren und Vorrichtung zur Werkzeugkühlung (#91) ★★★★★                                         |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Formwerkzeugkühlungssystem mit einer integralen und automatischen Leckprüfung (#105) ★★★★★        |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | System Apparatus and Method for micro-capillary heat exchanger (#219) ★★★★★                       |                                                                                     | #219 / S. 1 |
|  |  | >>> | Strangguß von Rohren oder Hohlknüppeln aus Metall sowie zur Energierückgewinnung (#234) ★★★★★     |  |             |
|  |  | >>> | Verfahren und Vorrichtung zur thermischen Kontrolle einer Stranggießkokille (#233) ★★★★★          |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Verfahren zum Härten eines Formwerkzeuges (#228) ★★★★★                                            |                                                                                     |             |
|  |  | >>> | Wärmetauscher mit Seitenplatten-Oberflächenkühlung (#169) ★☆☆☆☆                                   |                                                                                     |             |

Bildquellen: Nummern wie oben in Spalte Bild-Quelle

- 1 <http://www.mercedes-benz.ch/>
- 2 <http://images.fotocommunity.de/bilder/pflanzen-pilze-flechten/>
- 3 <http://galerie.designnation.de/bild/29566>
- 4 [http://kaweahoaks.com/html/datura\\_swirl02.jpg](http://kaweahoaks.com/html/datura_swirl02.jpg)
- 5 Citavi-Literatur #206 / S. 3
- 6 [http://eofdreams.com/data\\_images/dreams/antelope/antelope-04.jpg](http://eofdreams.com/data_images/dreams/antelope/antelope-04.jpg)
- 7 <http://www.bostonglobe.com/>
- 8 [http://assets.knowledge.allianz.de/img/delfin\\_shutterstock\\_q\\_34236.jpg](http://assets.knowledge.allianz.de/img/delfin_shutterstock_q_34236.jpg)
- 9 <http://www.abendblatt.de/img/schleswig-holstein/>
- 10 <http://raupe.files.wordpress.com/2006/12/03.jpg>
- 11 [https://naturfotografen-forum.de/data/media/21/Geier%20im%20Flug\\_a\\_1.jpg](https://naturfotografen-forum.de/data/media/21/Geier%20im%20Flug_a_1.jpg)
- 12 Citavi-Literatur #145 / S. 4
- 13 <http://www.tvmovie.de/>
- 14 <http://4.bp.blogspot.com/>
- 15 [https://naturfotografen-forum.de/data/media/15/Walddesigner\\_090403\\_003.jpg](https://naturfotografen-forum.de/data/media/15/Walddesigner_090403_003.jpg)
- 16 <http://www.halodubai.com/wp-content/uploads/2011/09/pinguin.jpg>
- 17 [http://www.medienwerkstatt-online.de/ws\\_wissen/bilder/1475-2.jpg](http://www.medienwerkstatt-online.de/ws_wissen/bilder/1475-2.jpg)
- 18 <http://img.welt.de/img/umwelt/>
- 19 <http://www.asknature.org/images/uploads/strategy/>
- 20 Citavi-Literatur #135 / S. 4
- 21 Citavi-Literatur #174 / S. 22
- 22 Citavi-Literatur #67 / S. 8
- 23 Citavi-Literatur #159 / S. 1
- 24 Citavi-Literatur #19 / S. 3
- 25 Citavi-Literatur #173 / S. 1
- 26 Citavi-Literatur #148 / S. 6
- 27 Citavi-Literatur #164 / S. 13
- 28 Citavi-Literatur #199 / S. 1
- 29 <http://www.flow3d.com/images/>
- 30 [http://img.directindustry.de/images\\_di/photo-g/-5846-4791131.jpg](http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/-5846-4791131.jpg)
- 31 Citavi-Literatur #36 / S. 59
- 32 Citavi-Literatur #126 / S. 8
- 33 Citavi-Literatur #182 / S. 9
- 34 Citavi-Literatur #83 / S. 16
- 35 Citavi-Literatur #144 / S. 4
- 36 Citavi-Literatur #159 / S. 12
- 37 Citavi-Literatur #126 / S. 10
- 38 Citavi-Literatur #56 / S. 2
- 39 Citavi-Literatur #23 / S. 5
- 40 Citavi-Literatur #7 / S. 31
- 41 <http://www.plastverarbeiter.de/bildergalerien/anzeigen/2811/1/text/14483/>