

ionicLife cast technology

Innovation in der Herstellung von Kühlformen aus Kupferguss

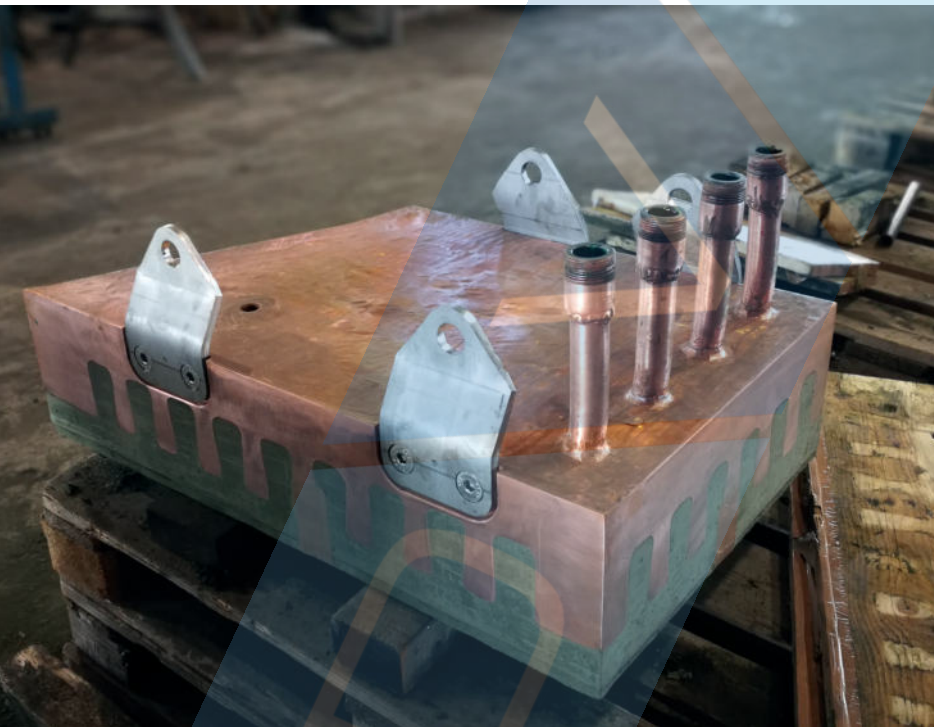
Mit einer innovativen Technologie zur Herstellung von Kupferkühlern wird der Kühlkanal aktiv während des Abgusses gekühlt und in Kupfer eingegossen. Das Ergebnis ist eine hervorragende Verbindung zwischen Kupfermatrix und Kupferrohr, was zu höchster Wärmeleitfähigkeit und auch Lebensdauer führt

Mettop GmbH und WeCo haben gemeinsam ein innovatives Gießverfahren entwickelt, welches das Gießen von großen Kupferkühlelementen (zum Beispiel Hochofen-Windformen, Abstichlöcher, Seitenwandpaneele am EAF, Rinnen und anderes) mit eingegossenem Kupferrohr ermöglicht. Dabei wird das Kupferrohr aktiv mittels einer nicht-explosiven ionischen Flüssigkeit während des Abgusses sicher gekühlt. Das Ergebnis ist eine ausgezeichnete metallurgische Verbindung zwischen Kupferrohr und Kupferguss, die einerseits zu einer langen Lebensdauer

und andererseits auch zur besseren Recyclingfähigkeit des Kupferkühlers führt.

Um eine hohe Kühlleistung und eine lange Lebensdauer dieser Kühler zu erreichen, eignen sich Kupferrohre für die Kühlkreisläufe am besten. Dies bringt die Herausforderung mit sich, eine dünne Metallstruktur in eine Umgebung mit einer großen Menge Metallschmelze, mit einer Temperatur höher als der Schmelzpunkt des Rohres, zu bringen. Die neu entwickelte Methode „ionicLife cast“ ermöglicht eine ausreichende Kühlung eines Kupferkühlkreislaufs während des Gießprozesses,

um das Schmelzen oder die Verformung des Kühlrohres zu verhindern. Da die Kühlung mit Gasen nicht ausreicht und der Einsatz von Wasser in Gegenwart von flüssigen Metallen extrem gefährlich wäre, ist die Kühlung mit einer ionischen Flüssigkeit die einzig sichere Variante. Diese ionischen Flüssigkeiten können in ihren Eigenschaften auf die jeweilige Anwendung angepasst werden. In diesem Fall handelt es sich um ein Kühlmedium, das bis zu 250 °C eingesetzt werden kann, und das sicher in der Handhabung und bei direktem Kontakt mit einer Metallschmelze ist.



Kupferkühlelement mit eingegossenen Rohrschlangen und kombinierter Feuerfestzustellung (Bild: Mettop GmbH)

Hans-Jörg Krassnig, Andreas Filzwieser, Tobias Hangler, Martina Hanel, Mettop GmbH, Leoben, Österreich; Javier Bolado, WeCo – weldingcopper, Los Corrales de Buelna, Spanien – Kontakt: hans-joerg.krassnig@mettop.com

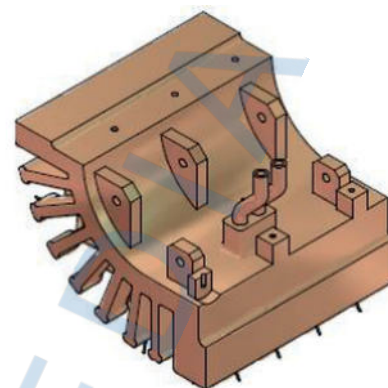
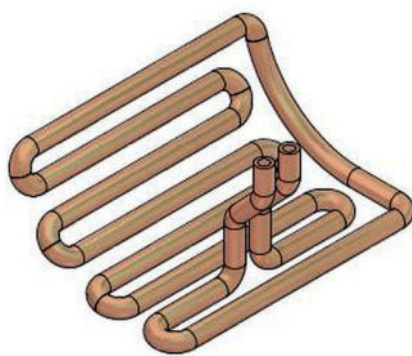
Stand der Technik bisher

In der Hüttentechnik werden vermehrt große Kühlelemente eingesetzt, um die Lebensdauer von Anlagenteilen durch intensive Kühlung in Verbindung mit der Feuerfestzustellung zu erhöhen [1]. Diese weisen oft komplexe Geometrien auf und verfügen über innenliegende Kühlkanäle, durch die eine Kühlflüssigkeit strömt. Um diesen geometrischen Herausforderungen gerecht zu werden und gleichzeitig akzeptable Herstellkosten zu gewährleisten, werden diese Elemente meist als Verbundguss hergestellt. Dies ist ein Verfahren, bei dem ein Festkörper definierter Abmessungen in eine Metallschmelze eingegossen wird.

Bei der Kühlerherstellung werden vorgeformte Rohrbögen mit einer Schmelze umgossen. Die durch die Rohre abgeformten Kanäle dienen im fertigen Produkt als Kühlschlangen, durch welche das Kühlmedium strömt. Durch die Kombination des Sandgussverfahrens mit dem Eingießen von vorgeformten Kühlschlangen wird es möglich, komplexe Geometrien herzustellen. So werden beispielsweise Deckenkühler für metallurgische Aggregate hergestellt.

Da die Anwender höchste Wärmeleitfähigkeit und Standzeit der Kühlelemente fordern, wird als Gussmetall oft Reinkupfer verwendet. Um eine möglichst gute Wärmeleitung zu erreichen, wäre es von Vorteil, dass auch das Rohr aus reinem Kupfer besteht. Daraus ergibt sich aber die Schwierigkeit, dass das einzugießende Objekt den gleichen Schmelzpunkt hat wie das flüssige Metall, mit dem es einen Verbund eingehen soll. Daher kann es leicht zum örtlichen Durchschmelzen des Strukturteils (Rohr) kommen, wenn dieses nicht von Innen gekühlt wird. Damit wird das Gussstück zum Ausschuss, da die Kühlkanäle beschädigt werden und die Kühlwirkung reduziert wird. Die Einflussfaktoren der Herstellungsparameter auf die Wärmeleitung derartiger Kupferkühler mit Kupferrohren im Inneren werden im Folgenden erörtert.

Einsatzgebiet und Umfeld. In metallurgischen Anlagen werden immer mehr Bereiche in den Zonen stärkster Beanspruchung mit intensiven Kühlungen ausgestattet. Durch die Kühlung hinter dem Feuerfestmaterial wird der Temperaturgradient zwischen der Schmelze im Ofeninnenraum



Schematischer Aufbau eines Kupferkühlers: links die Rohrschleifen vor dem Abgießen, rechts der fertige Kühler (Bild: Mettop GmbH)

über die Feuerfestzustellung bis hin zum Stahlmantel steiler. Dadurch wird das Anfrischen einer Schlackenschicht ermöglicht oder die Eindringtiefe in die Poren des Feuerfestmaterials verringert sich. Als Folge erreicht man einen gleichmäßigeren Verschleiß der Gesamtzustellung, wodurch sich die Standzeit des gesamten Ofens verlängert.

Diese Kühlungen werden mittels Kühlelementen aus Stahl oder Kupfer und der Verwendung unterschiedlicher Kühlmedien umgesetzt. Aktuell bestehen die meisten Kupferkühler aus gegossenem Reinkupfer mit eingegossenen Kühlschleifen aus Edelstahl, Monel oder Kupfer.

Wenn die heißseitige Kühlfläche eines Kupferkühlers verschlissen ist, muss dieser komplett ausgetauscht werden. Der Kupferkühler muss bis dato vollständig recycelt werden. Die mechanische Trennung der Rohre vom Kupfergussteil ist meist nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar, weshalb die Reststücke der Elemente meistens im Primäraggregat oder Konverter einer Kupferhütte eingeschmolzen werden.

Würde ein Kühlelement zur Gänze nur aus reinem Kupfer bestehen, so wäre ein Recyceln viel einfacher möglich. Das Kühlelement könnte in einem Schmelzofen einer Kupfergießerei einfach wieder aufgeschmolzen und zu einem neuen Kühler abgegossen werden. Das Produkt würde am Ende der Lebenszeit einen höheren Restwert besitzen als bisher. Dies bringt dem Kunden im Vergleich zu aktuell verfügbaren Kühlern eine Kostenersparnis über den gesamten Lebenszyklus des Produkts.

Die Verwendung von Monel oder Stahlrohren beeinträchtigt jedoch nicht nur die

Aufbereitung von alten Kühlelementen. Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Rohrmetalle und dem Kupferguss entstehen im Betrieb Spannungen, welche oftmals zur Spaltbildung führen. Wenn sich das Rohr vom restlichen Kupferblock ablöst und sich ein feiner Luftspalt bildet, wird die Wärme nur noch unzureichend abgeführt und das Element verschleißt rascher durch die stärkere lokale thermische Belastung. Dies ist besonders in Öfen ein Problem, welche zyklischen Temperaturschwankungen unterliegen, wie beispielsweise ein Elektrolichtbogenofen.

Wenn nur Kupfer als Werkstoff verwendet wird, besitzen Rohr und Matrix dieselben Ausdehnungscharakteristika und es entstehen keine resultierenden Spannungen [2, 3].

Limitierungen der bisher genutzten Verfahren

Bei der Verwendung von Kupferrohren wird oft auf eine elektrolytische Beschichtung zurückgegriffen, um die Bindung zu verbessern. Dieser Prozess ist nicht nur sehr kostenintensiv, sondern verbraucht neben den Ressourcen Nickel und Silber auch beträchtliche Mengen an Energie und verschlechtert die Rezyklierbarkeit. Da keine der nachstehenden Technologien alle Zielsetzungen vollständig erfüllt, ist die Entwicklung eines neuen Prozesses von Interesse.

Bohren von Kupferblöcken. Dies ist ein einfaches und kostengünstiges Verfahren, welches schon lange Verwendung findet und für einfache Geometrien gut geeignet ist [4]. Die Probleme hierbei sind jedoch,

dass komplexere, runde oder gewölbte Geometrien der Kühlkanäle nicht realisierbar sind und dass die offenen Enden der Bohrkäule wieder verschlossen werden müssen. Diese zugeschweißten Fügestellen sind Schwachstellen, da sie immer wieder zu Leckagen im Betrieb führen. Eine derartige Fehlfunktion stellt im Falle einer Wasserkühlung ein großes Sicherheitsrisiko dar. Es kann zu einer Dampfexplosion kommen, wenn das Kühlwasser direkt mit einer Metallschmelze in Kontakt kommt. In weiterer Folge kann das austretende Wasser aus kleinen Leckagen die Lebensdauer der umgebenden Feuerfestmaterialien durch Feuchtigkeitsaufnahme stark beeinträchtigen [5].

Umgießen von Stahlrohren in Sandgussformen. Anstatt die Kühlkanäle durch Bohrungen zu fertigen, werden bei diesem Verfahren Stahlrohre verwendet, um die Kühlkanäle abzubilden. Sie werden zu Rohrbündeln verarbeitet, welche in der Sandform positioniert werden. Diese Rohre (niedrig sowie hochlegierte) sind relativ einfach in der Handhabung und günstig in der Verarbeitung. Sie können problemlos eingegossen werden, da ihr Schmelzpunkt deutlich über dem von Kupfer liegt. Problematisch sind jedoch das Fehlen der metallischen Bindung zwischen dem eingegossenen Rohr und der Kupfermatrix, sowie die deutlich unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Diese füh-

ren zu einer geringen Grenzschicht-Festigkeit und einem schlechten Wärmeübergang. Es kommt hier zur Ablösung des Rohrs von der Kupfermatrix. Die so entstehenden Spalten haben auch bei nur geringsten Breiten eine große negative Auswirkung auf den Wärmeübergang. Die Gesamteffizienz der Kühlblöcke wird zusätzlich durch die geringe Wärmeleitfähigkeit von Stahl verschlechtert [7].

Eingießen von Monelrohren in Sandgussformen. Monel-Legierungen sind Cu-Ni-Legierungen mit einem höheren Schmelzpunkt als Reinkupfer. Sie können daher, ähnlich wie Stahlrohre, einfach ohne Kühlung oder Stützen eingegossen werden und zeigen vor allem in Kombination mit Beschichtungen eine deutlich bessere metallische Bindung zu dem umgebenden Kupfer als Stahl.

Monelrohre sind jedoch aufgrund des hohen Nickelanteils sehr teuer und können wegen ihrer hohen Festigkeit kaum gebogen werden. Stattdessen muss auf vorgefertigte Rohrbögen zurückgegriffen werden, die dann verschweißt werden. Neben den erhöhten Fertigungskosten aufgrund des zusätzlichen Fertigungsaufwandes, der dafür benötigt wird, ist jede Schweißnaht auch eine potentielle Fehlstelle. Das häufig verwendete Material Monel 400 weist einen ähnlich niedrigen Wärmeleitkoeffizienten wie Edelstahl (1.4301: 15 [W/(m·K)], Monel: ~22 [W/(m·K)], Kup-



Geätztes Schliiffbild eines Kühlers
(Bild: Mettop GmbH)

fer: 380 [W/(m·K)]) auf, wodurch sich auch hier, trotz einer deutlich besseren Bindung zum Kupfer, eine reduzierte Effizienz der Kühler einstellt [1].

Eingießen von sandgefüllten Kupferrohren im Sandguss. Bei diesem Verfahren besteht auch das Rohr aus Kupfer, damit die Wärme besser abgeleitet werden kann und kein Engpass beim Wärmeabtransport entsteht. Dies bedeutet jedoch, dass der Werkstoff des Rohrs den gleichen Schmelzpunkt besitzt wie jener der Schmelze. Das führt dazu, dass das Rohr erweicht oder sogar aufschmilzt und damit die Kühlkanäle nicht formgetreu abgebildet werden können.

Oftmals werden daher die Rohre zuvor dicht mit Sand gepackt, wodurch sie wäh-



Gekühltes Abstichloch, hergestellt mit dem ionicLifecast-Verfahren (Bild: Mettop GmbH)



ILTEC Anlage zur aktiven Kühlung von Hochtemperaturanwendungen (Bild: Mettop GmbH)

rend des Gusses formstabiler sind. Daraus ergibt sich jedoch das Problem, dass Sandrückstände im Rohr verbleiben, welche während der Verwendung ausgeschwemmt werden und in den Kühlkreislauf gelangen. Dort verursachen sie Schwierigkeiten mit Pumpen und Filtern.

Außerdem ist dieses Verfahren in der maximalen Größe der Kupferkühler stark eingeschränkt. Bei großen Gussstücken schmilzt das Rohr auf oder bekommt Risse. Solche Fehlgüsse bestehen dann die gängigen Prüfmethoden der Qualitätskontrolle nicht und können daher nicht verwendet werden und meist auch nicht repariert werden. Derartiger Ausschuss stellt einen entsprechenden finanziellen Schaden für die Gießerei dar. Die gängigsten Qualitätsüberprüfungen sind eine Druckprüfung bei 8-10 bar mit Wasser, bei der die Dichtheit des Systems überprüft wird und der Ball-Test, bei dem ein kugelförmiger Prüfkörper definierten Durchmessers durch die Rohrleitungen geblasen wird, um sicherzustellen, dass der Innenrohrdurchmesser durchgängig ausreichend groß ist [1].

Gießen mit Hilfe von Sandkernen. Ähnlich wie im Automobilbau ganze Motorblöcke mit Hilfe von Sandguss und Sandkernen hergestellt werden, können

diese Kerne auch verwendet werden, um Kühlkanäle in Kühlelementen herzustellen. Hierbei limitiert die relativ geringe Festigkeit der Formstoffe jedoch die möglichen Geometrien und die Sandkerne müssen oftmals unterstützt werden. Sie würden sonst durch ihr Eigengewicht oder auch durch den Auftrieb in der Schmelze abbrechen. Die eingeschränkte Formfreiheit, der Aufwand für das Entfernen des Sandes aus dem Inneren des fertigen Gussstücks sowie die verbleibenden Sandreste in den Kühlkanälen stellen hier die größten Probleme dar. Stützstrukturen führen zu Löchern, welche durch Schweißen oder andere Verfahren geschlossen werden müssen und daher auch wieder ein erhöhtes Leckage-Risiko darstellen. Dieses Herstellungsverfahren wird daher in der Industrie kaum angewandt.

Eintauchen von Rohrbündeln in flüssiges Kupfer nach dem Abguss. Es existieren ebenfalls Ansätze, dass das Rohrbündel erst nach dem Abgießen in die Schmelze getaucht wird. Dadurch soll das Aufschmelzen der Rohre vermieden werden. Hierbei sind die möglichen Geometrien jedoch stark eingeschränkt und die Positioniergenauigkeit ist geringer [8]. Die Ver-

wendung von Speisern und geschlossenen Sandformen ist nicht möglich, weshalb auch dieses Herstellungsverfahren nicht angewandt wird.

ionicLife cast Verfahren

Die treibende Kraft hinter der Entwicklung des ionicLife cast Verfahren war das Ziel, ein sicheres Herstellungsverfahren, mit dem bestmöglichen Wärmeübergang und bester Wiederverwertbarkeit der Kupferkühlelemente zu ermöglichen. Um einen optimalen Wirkungsgrad der Kühlung zu erzielen, ist die Verwendung von Kupferrohren generell als Optimum zu sehen, da Kupfer die Wärme am besten von allen Technologiemetallen leitet.

Bei größeren Gussteilen, hohen Rohrlängen, dünneren Rohrwandstärken und hohen Gießmodulen ist eine aktive Innenkühlung erforderlich, da die Kupferrohre sonst durch die hohe thermische Belastung während des Abgusses durchschmelzen. Wasser kann nicht als Kühlmittel verwendet werden, da ein akutes Explosionsrisiko besteht, wenn es in Kontakt mit Metallschmelzen kommt [5, 9, 10]. Durch die spontane Vervielfachung des Volumens von dem flüssigen Wasser zu

Wasserdampf entstehen enorme Drücke mit explosionsartiger Wirkung.

Aus diesen Sicherheitsüberlegungen bieten sich als alternative Kühlmedien für derartigen Anwendungen ionische Flüssigkeiten an. Diese können in einem größeren Temperaturfenster verwendet werden. Durch den äußerst niedrigen Dampfdruck stellen sie im Schadensfall bei hohen Temperaturen kein Sicherheitsrisiko dar, da sie sich lediglich zersetzen und es zu keiner explosionsartigen Verpuffung kommt. Viele der marktüblichen ionischen Flüssigkeiten sind jedoch stark korrosiv, weshalb im ionicLife cast Verfahren die patentierte nicht korrosive ionische Flüssigkeit IL-B2001 eingesetzt wird [9].

Funktion und Aufbau der ILTEC-Anlage.

Eine ILTEC Anlage besteht im Prinzip aus folgenden Komponenten:

- einem Tank, in dem die Kühlflüssigkeit gespeichert wird,
- einer Pumpe zur Förderung sowie
- einem Wärmetauscher und
- einem Durchlauferhitzer zur Temperierung der Flüssigkeit.

Des Weiteren sind diese Anlagen mit Sensoren für die Durchfluss- und Temperaturmessung ausgestattet. Da die Temperatur an der Grenzfläche zwischen Rohr und Gusskupfer in der Produktion nicht gemessen werden kann, sondern lediglich jene der Kühlflüssigkeit, werden anhand der dort vorherrschenden Trends Rückschlüsse auf die Bedingungen gezogen. Die hierfür relevante Messstelle befindet sich beim Wiedereintritt der Flüssigkeit in die Maschine, nachdem diese durch die einzugießenden Cu-Rohre gepumpt wurde.

Die hier gemessene Temperatur der ionischen Flüssigkeit während des Abgusses wird für die Analyse der thermischen Belastung der Flüssigkeit sowie für die Prozesskontrolle verwendet und spiegelt die aus den Kühlern entzogene Wärme über die Zeit wider.

Vorteile. Die abgeführte Wärme aus dem Kühlkreislauf führt zu einer beschleunigten und gelenkten Erstarrung. Die Kühler erstarren folglich von innen heraus, was zu einer Vereinfachung der vollständigen Formfüllung und einem günstigeren Gussgefüge führt. Durch die Kühlung findet der Erstarrungsprozess in einem Bruchteil der normalen Zeit statt und es bilden sich sehr viel kleinere, gerichtete Körner im erstarrten Kupferblock. Dies hat wiederum einen positiven Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Produkts und verbessert so Festigkeit, Härte und Zähigkeit im Vergleich zu konventionellen Gussstücken [3].

Zusammenfassung und Ausblick

Das ionicLife cast Verfahren ermöglicht erstmalig die Herstellung von großen Küh-

lern mit einer ausgezeichneten metallurgischen Verbindung zwischen Kupferrohr und Kupferguss. Das Risiko der Spaltbildung zwischen Kupferrohr und Kupfermatrix ist dadurch eliminiert. Der Einsatz von hochreinem Kupfer mit höchster Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine verbesserte Kühleffizienz der eingesetzten Kühler und führt andererseits zu einer längeren Lebensdauer, da auch lokale „Hot Spots“ deutlich besser abgebaut werden können. Die Recyclingfähigkeit der ionicLifecast-Kupferkühler ist aufgrund der Materialhomogenität sichergestellt.

Obwohl das Leckage Risiko durch den Einsatz von „ionicLifecast“-Kühlern deutlich reduziert werden kann, stellt der Austritt von Wasser und einer damit verbundenen Explosionsgefahr weiterhin ein mögliches Gefahrenpotenzial dar. Dies kann nur durch den Einsatz von ionischen Flüssigkeiten anstelle von Wasser als Kühlmedium bei metallurgischen Anlagen ausgeschlossen werden, wie es bereits in zahlreichen industriellen Anwendung (z.B.: Hochofenabstich, Konverter-Lanzekühlung) unter Beweis gestellt wurde [11].

Literatur

- [1] MACRAE, A. (2018): Furnace-wall cooling block, <https://patents.google.com/patent/US6280681>
- [2] HAASEN, P (1994).: Physikalische Metallkunde, Berlin, Heidelberg (u.a.): Springer Berlin Heidelberg
- [3] HILLE, H. & OTREMBA, W (1996): Kühlplatten für Schachtöfen, <https://patents.google.com/patent/EP0741190B1> (29.03.2018)
- [4] PFEIFENBRING, K (2016): Kühlelement für metallurgische Öfen sowie Verfahren zur Herstellung

eines Kühlelements, <https://patents.google.com/patent/DE102015001190A1/de?oq=EP+0816515+B1> (29.03.2018)

- [5] STEIN, U. (1998): Kühlplatte für metallurgische Öfen der Eisen- und Stahlindustrie, <https://patents.google.com/patent/EP0816515B1>
- [6] PFEIFENBRING, K. & HERING, M. (2003): Kühlelement, insbesondere für Öfen, sowie Verfahren zur Herstellung eines Kühlelementes
- [7] SEPPALÄ, K. & KOIOTTO J. & SAARINEN, R. (2008): Kühlelement und Verfahren zu dessen Herstellung, <https://patents.google.com/patent/EP1954999B1/de?oq=EP-1954999B1> (29.03.2018)
- [8] PFEIFENBRING, K. & HERING, M. (2003): Kühlelement, insbesondere für Öfen, sowie Verfahren zur Herstellung eines Kühlelementes
- [9] FILZWIESER, A. & FILZWIESER I. (2010).: Method for cooling a metallurgical furnace: CA Grant, <https://patents.google.com/patent/WO2010136403A1/en?q=Method&q=cooling&q=metallurgi-cal+furnace&assignee=mettop&oq=Method+for+cooling+a+metallurgical+furnace+mettop>
- [10] HANGLER, T. (2020): Masterarbeit Ermittlung der Einflussgrößen für die Verbindungsbildung bei dem Kupferverbundguss von Kühlelementen, Montanuniversität, Leoben
- [11] Hanel, M., Filzwieser A. (2019): ILTEC Technology – New Pathways towards safe and effective cooling, ESTAD 2019

