



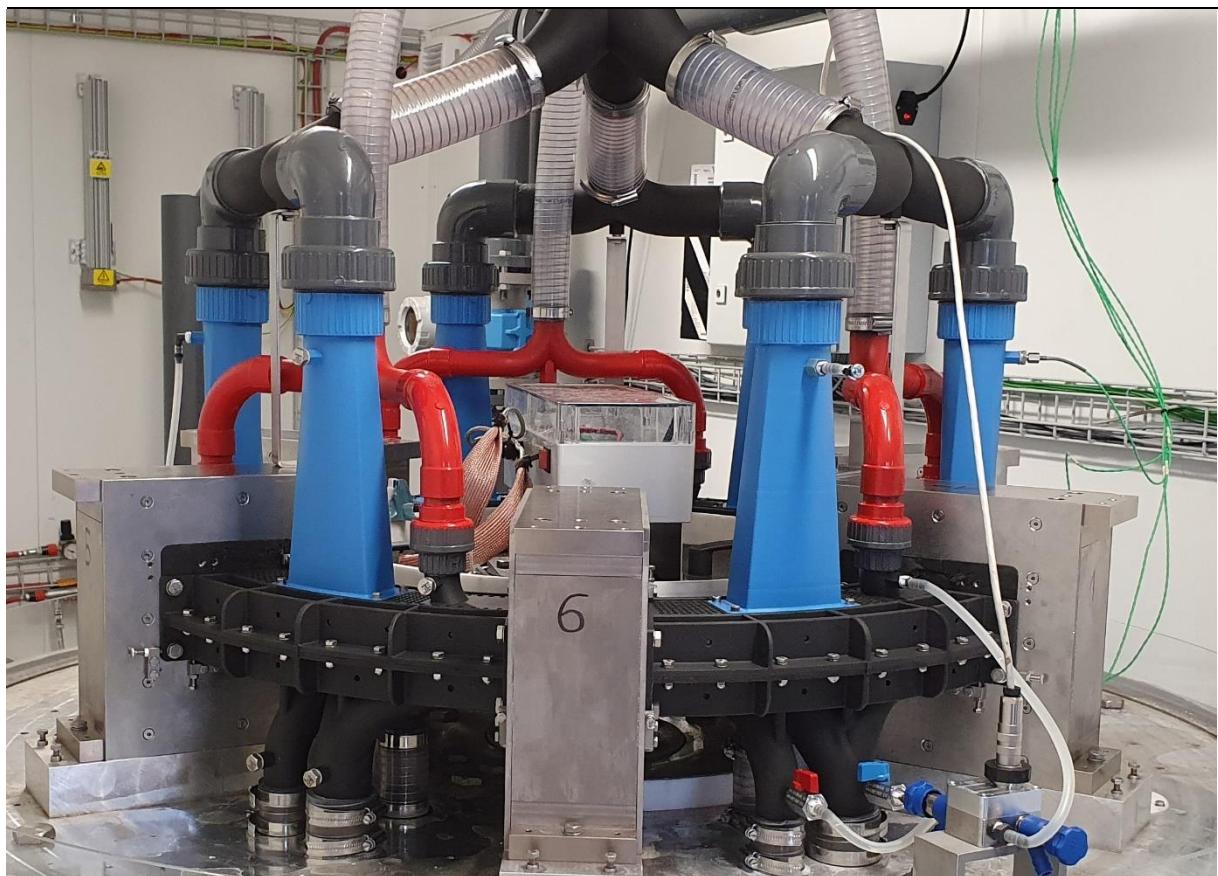
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 07.06.2022

Realisierung des Funktionsmusters K2 des Thermo-Magnetischen Motors (TMM)

Nachweis elektrischer Nettoleistung



Quelle: © SBE 2022



Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Technik



Datum: 07.06.2022

Ort: Windisch und Bad Zurzach

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfängerinnen:

Swiss Blue Energy AG
Baslerstrasse 6
CH-5330 Bad Zurzach
www.sbe-ag.ch

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Hochschule für Technik
Klosterzelgstrasse 2
CH-5210 Windisch
www.fhnw.ch

Autoren:

Christian Schöchlin, Fachhochschule Nordwestschweiz, christian.schoechlin@fhnw.ch
Silvio Krauss, Swiss Blue Energy AG, silvio.krauss@sbe-ag.ch

BFE-Projektbegleitung:

Roland Brüniger, roland.brueniger@brueniger.swiss

BFE-Vertragsnummer: SI/502222-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Projektes hat *Swiss Blue Energy* mit dem TMM K2 erstmals einen *Thermo-Magnetischen Motor* (TMM) mit signifikanter elektrischer Nettoleistung entwickelt, der Abwärme auf einem Temperaturniveau von 60 °C in mechanische Energie umwandelt. Damit wurde ein weltweit einzigartiger Meilenstein erreicht. Einerseits konnte der äusserst wichtige *Proof of Technology* erbracht werden und andererseits wird der TMM K2 helfen, die Bekanntheit und Attraktivität der TMM-Technologie weiter zu steigern. Durch ein neuartiges Strömungskonzept mit deutlicher Reduzierung der Druckverluste gegenüber früheren Anlagen konnte das *Back Work Ratio* (BWR) um mehr als eine Grössenordnung auf ca. 0.1 verringert werden und damit eine elektrische Nettoleistung in der Grössenordnung von 500 W erzielt werden. Daneben wurde die Separierung der kalten bzw. warmen Fluidströme umgesetzt, sodass das Potential für den mehrstufigen Betrieb (Kaskadierung) rechnerisch abgeschätzt werden konnte. Unterstützt wurde *Swiss Blue Energy* massgeblich durch die *Fachhochschule Nordwestschweiz* (FHNW), welche die Auslegung der Komponenten durch numerische Simulationen begleitete und für die messtechnische Validierung der Berechnungen hochauflösende Temperaturmessungen der Materialerwärmung/-kühlung bzw. Rotordurchströmung ermöglichte.

Für zukünftige Anwendungen bzw. Weiterentwicklungen der TMM-Technologie wird der Fokus aus Effizienz- und Kostengründen auf neuartigen magnetokalorischen Materialien liegen und den damit verbundenen Prozessentwicklungen. Auf dem Gebiet der Materialforschung und -entwicklung arbeitet *Swiss Blue Energy* intensiv mit internationalen Partnern, primär mit der *Technischen Universität Delft*, zusammen, um mittelfristig effiziente und preisgünstige Alternativen zum derzeit verwendeten Material (Gadolinium) einsetzen zu können. *Swiss Blue Energy* ist somit bestens aufgestellt, um zukünftige Schritte in Richtung eines effizienteren und leistungsstärkeren Prototyps angehen zu können.

Résumé

Dans le cadre du présent projet, *Swiss Blue Energy* a développé pour la première fois, avec le TMM K2, un *Moteur Thermo-Magnétique* (TMM) d'une puissance électrique nette significative, qui transforme la chaleur résiduelle en énergie mécanique à un niveau de température de 60 °C. Une étape unique au monde a ainsi été franchie. D'une part, la *Preuve de Technologie* extrêmement importante a pu être apportée et, d'autre part, le TMM K2 contribuera à accroître encore la notoriété et l'attrait de la technologie TMM. Grâce à un nouveau concept d'écoulement avec une nette réduction des pertes de pression par rapport aux installations précédentes, le *Back Work Ratio* (BWR) a pu être réduit de plus d'un ordre de grandeur à environ 0,1 et une puissance électrique nette de l'ordre de 500 W a ainsi pu être atteinte. En outre, la séparation des flux de fluides chauds et froids a été réalisée, de sorte que le potentiel d'un fonctionnement en plusieurs étapes (cascade) a pu être évalué par calcul. *Swiss Blue Energy* a été largement soutenue par la *Haute école spécialisée du Nord-Ouest de la Suisse* (FHNW), qui a accompagné la conception des composants par des simulations numériques et a permis de réaliser des mesures de température à haute résolution de l'échauffement/refroidissement des matériaux ou de l'écoulement du rotor pour la validation des calculs.

Pour des raisons d'efficacité et de coûts, les applications futures et les développements de la technologie TMM se concentreront sur de nouveaux matériaux magnétocaloriques et sur les développements de processus qui y sont liés. Dans le domaine de la recherche et du développement de matériaux, *Swiss Blue Energy* travaille intensivement avec des partenaires internationaux, en premier lieu avec *l'Université technique de Delft*, afin de pouvoir utiliser à moyen terme des alternatives efficaces et bon marché au matériau actuellement utilisé (gadolinium). *Swiss Blue Energy* est donc bien placée pour franchir les futures étapes vers un prototype plus efficace et plus performant.



Summary

Within the scope of the present project, *Swiss Blue Energy* has developed the TMM K2, the first *Thermo-Magnetic Motor* (TMM) with significant net electrical power that converts waste heat into mechanical energy at a temperature level of 60 °C. This represents a milestone that is unique in the world. On the one hand, the extremely important *Proof of Technology* could be provided and on the other hand, the TMM K2 will help to further increase the awareness and attractiveness of TMM technology. Thanks to a novel flow concept with a significant reduction of pressure losses compared to earlier systems, the *Back Work Ratio* (BWR) could be reduced by more than one order of magnitude to approx. 0.1 and thus a net electrical power in the order of 500 W could be achieved. In addition, the separation of the cold and hot fluid flows was implemented so that the potential for multi-stage operation (cascading) could be estimated mathematically. *Swiss Blue Energy* was significantly supported by the *University of Applied Sciences Northwestern Switzerland* (FHNW), which accompanied the design of the components by numerical simulations and enabled high-resolution temperature measurements of the material heating/cooling and the flow temperature for the validation of the calculations.

For future applications and further developments of TMM technology, the focus will be on novel magnetocaloric materials and the associated process developments for reasons of efficiency and cost. In the field of materials research and development, *Swiss Blue Energy* is working intensively with international partners, primarily with the *Delft University of Technology*, in order to be able to use efficient and low-cost alternatives to the currently used material (gadolinium) in the medium term. *Swiss Blue Energy* is thus well positioned to take future steps towards a more efficient and powerful prototype.

Take-home messages

- Weltweit einzigartiger und vermutlich leistungsstärkster *Thermo-Magnetischer Motor* (TMM) mit einer elektrischen Nettoleistung von rund 500 W zur Umwandlung von Niedertemperaturabwärme (~ 60 °C) in mechanische bzw. elektrische Energie.
- Reduktion des *Back Work Ratio* (BWR) auf ca. 0.1 durch ein neuartiges Strömungskonzept mit geringen Druckverlusten und optimierter Strömungsführung (Reduktion des BWR gegenüber Vorgängeranlage TMM K1 um mehr als eine Größenordnung). Dies entspricht einer aufgewendeten Leistung (Pumpleistung) von ca. 65 W bei einer erzeugten mechanischen Leistung von ca. 700 W.
- Geschlossene Fluidführung mit Separierung der Fluidströme (warm/kalt) zeigt Potenzial für Kaskadierung (Mehrstufigkeit) auf für zukünftige Effizienzsteigerungen und die nötige Leistungsskalierung.
- TMM K2 ist sowohl Entwicklungsprüfstand als auch Showcase-Anlage für Besichtigungen und Vorführungen der TMM-Technologie von *Swiss Blue Energy*.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	7
1.2 Motivation des Projektes	8
1.3 Projektziele	8
2 Anlagenbeschrieb	9
3 Vorgehen und Methode	12
4 Ergebnisse und Diskussion	14
4.1 TMM K2-Entwicklung (SBE)	14
4.1.1 Konzept.....	14
4.1.2 Komponentenentwicklung	14
4.1.3 Komponententests.....	15
4.1.4 Design- und Realisierungsphase.....	16
4.1.5 Inbetriebnahme und Messbetrieb	17
4.2 Detailuntersuchungen (FHNW)	20
4.2.1 Magnetostatik-Simulationen	20
4.2.2 CFD-Simulationen	22
4.2.3 Transiente Temperaturmessungen (Rotor)	31
4.2.4 Validierung.....	40
4.3 Materialforschung (TU Delft)	43
4.3.1 AP: <i>New magnetocaloric materials for heat pumps operating in low magnetic fields</i>	44
4.3.2 AP: <i>New materials suited for waste heat recovery</i>	44
4.3.3 AP: <i>New computational studies to support the experimental studies</i>	45
5 Schlussfolgerungen und Fazit	48
6 Ausblick und zukünftige Umsetzung	49
7 Nationale und internationale Zusammenarbeit	50
8 Literaturverzeichnis	50



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHT	Conjugate Heat Transfer
CNS	Chromnickelstahl
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz, Inst. für Thermo- und Fluid-Engineering
Gd	Gadolinium
MCE	Magnetokalorischer Effekt
RB	Randbedingungen
SBE	Swiss Blue Energy AG
SimBlue2	SBE-Berechnungsmodell
TMM	Thermo-Magnetischer Motor
TMM K1	1. Generation des TMM
TMM K2	Neuste Generation des TMM
TMM K3	Zukünftige Generation des TMM mit neuartigem Material
TU Delft	Technische Universität Delft



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Swiss Blue Energy (SBE) beschäftigt sich mit der Entwicklung des Thermo-Magnetischen Motors (TMM), welcher basierend auf dem **magnetokalorischen Effekt** (MCE) Abwärme niedriger Temperatur (< 80 °C) in mechanische und schliesslich in elektrische Energie umwandelt. Dabei werden spezielle Materialien, im vorliegenden Fall Gadolinium (Gd), eingesetzt, bei welchen sich die magnetischen Eigenschaften bei einer bestimmten Temperatur (CURIE-Temperatur) ändern und damit ihr Verhalten zwischen ferro- und paramagnetisch «umgeschaltet» werden kann. Durch gezieltes Erwärmen und Kühlen des magnetokalorischen Materials im Rotor kann in Kombination mit feststehenden Permanentmagneten eine Drehbewegung generiert und schliesslich mittels eines Generators elektrische Energie erzeugt werden. Die einzelnen Phasen eines TMM-Zyklus sind nachfolgend dargestellt.

1 Kühlung	Das magnetokalorische Material wird unter die CURIE-Temperatur gekühlt und weist dadurch ferromagnetisches Verhalten auf
2 Anziehung	Das gekühlte Material im ferromagnetischen Zustand wird vom starken Magnetfeld eines Permanentmagneten angezogen und verrichtet dabei Arbeit
3 Erwärmung	Innerhalb des Magnetfeldes wird das magnetokalorische Material über die CURIE-Temperatur erwärmt und wechselt dadurch in den paramagnetischen (nicht-magnetischen) Zustand
4 Nächster Zyklus	Das erwärmte Material kann das Magnetfeld nahezu kraftfrei verlassen und befindet sich wieder im Ausgangszustand für den nachfolgenden Zyklus

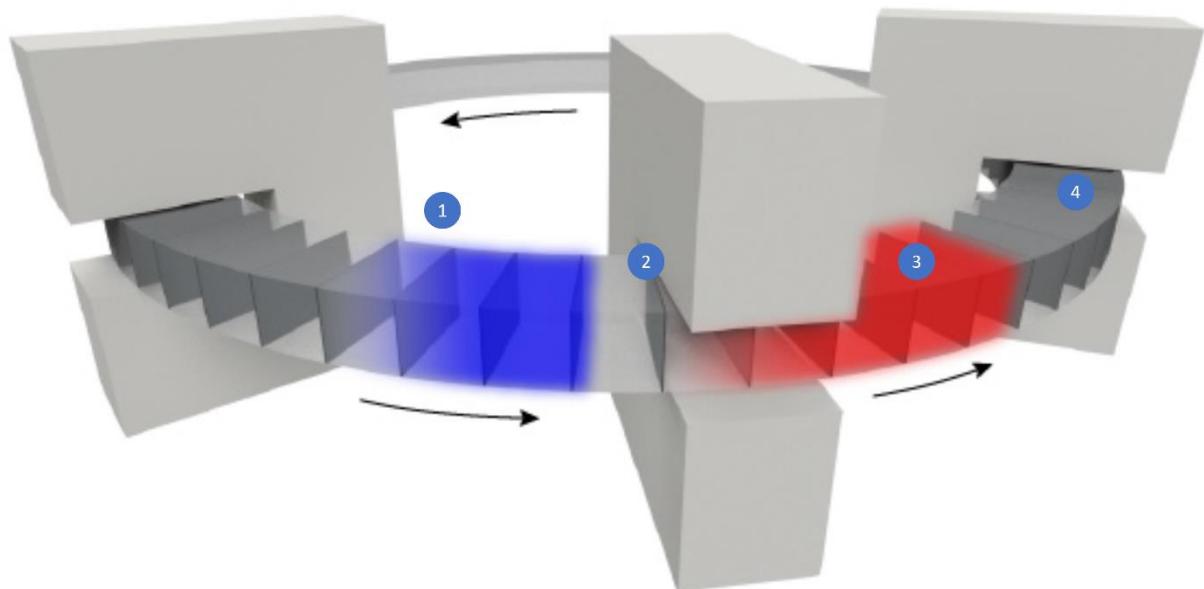


Abb. 1 Funktionsprinzip des Thermo-Magnetischen Motors (TMM)

Neben einem Inhouse-Demonstrator TMM K0, der sporadisch betrieben wird und primär für die Veranschaulichung des technologischen Prinzips dient, betreibt SBE den TMM K1 im industriellen Umfeld, wo er inzwischen über 25'000 Betriebsstunden aufweist und wertvolle Erfahrungen in Bezug auf die



industrielle Integration und den Dauerbetrieb ermöglichte. Mit dem TMM K2 hat SBE nun erstmals eine Anlage, welche effektiv elektrische Leistung abgibt und sich daneben sehr gut als Showcase-Anlage eignet, um die TMM-Technologie zu präsentieren.



Abb. 2 TMM K0 (Inhouse-Demonstrator)



Abb. 3 TMM K1-Container

1.2 Motivation des Projektes

Bei den in der Vergangenheit entwickelten Demonstratoren TMM K0 sowie TMM K1 lag der Fokus primär auf dem *Proof of Concept* bzw. der mechanischen Leistung und folglich benötigten diese Anlagen i. Allg. deutlich mehr Energie für den eigenen Betrieb als sie selbst erzeugen konnten. Der Fokus des vorliegenden Projektes liegt daher erstmals auf der elektrischen Nettoleistung, d. h. der Differenz zwischen abgegebener Leistung und benötigter Leistung für den Betrieb. Da eine ernstzunehmende Technologie erst vorliegt, wenn eine bedeutsame Nettoleistung erzielt werden kann, hat die Erbringung des Nachweises einer signifikanten Nettoleistung für SBE höchste Priorität (*Proof of Technology*). Mit diesem Ziel startete das TMM K2-Entwicklungsprojekt bei SBE im Frühling 2020, welches ab dem 1. März 2021 durch das *Bundesamt für Energie* (BFE) gefördert wurde. Als Hochschulpartner konnte die *Fachhochschule Nordwestschweiz* (FHNW), im Speziellen das *Institut für Thermo- und Fluid-Engineering*, gewonnen werden, wobei SBE besonders in den Bereichen Simulation und Messtechnik unterstützt wurde.

1.3 Projektziele

Das übergeordnete Ziel bestand in der Entwicklung und Realisierung des Demonstrators TMM K2, welcher den **Nachweis einer elektrischen Nettoleistung** in der Größenordnung von 1 kW ermöglichen soll. Dies ist mit einem *Back Work Ratio* (BWR) von << 1 verbunden, d. h. die für den Betrieb notwendige Leistung muss deutlich kleiner sein als die erzeugte Leistung, da sonst (noch) keine sinnvolle Technologie vorliegt. Daneben können als untergeordnete Zielsetzungen die Fluidtrennung (Separierung der warmen und kalten Fluidströme am Austritt) für die potenzielle Kaskadierung, eine kompakte Baugröße sowie die Eignung für Vorführungen/Besichtigungen (Showcase) genannt werden. Insbesondere die Fluidtrennung stellt eine wichtige Zielsetzung dar, da im Gegensatz zu früheren Anlagen, wo das warme und kalte Wasser jeweils vermischt wurde, beim TMM K2 am Austritt beide Ströme separiert vorliegen sollen, um die verbleibende Temperaturdifferenz hypothetisch in einer nächsten Stufe nutzen zu können. Auf der theoretischen Seite hat SBE seit jeher den Anspruch, den TMM-Gesamtprozess in einem internen Berechnungsmodell bzw. Auslegungstool (nachfolgend *SimBlue2* genannt) realitätsnah abbilden zu können.



2 Anlagenbeschrieb

Beim TMM K2 handelt es sich um eine komplett instrumentierte Laboranlage, welche in einer Heizzentrale in Windisch aufgebaut wurde. Die dort vorliegenden Randbedingungen, insbesondere in Bezug auf die für den Betrieb nötigen Kalt- und Warmwasservolumenströme, bieten ideale Voraussetzungen für den Labor bzw. Messbetrieb des TMM K2.

Der Aufbau des TMM K2-Demonstrators besteht im Wesentlichen aus einer Rotorscheibe, die mit magnetokalorischem Material, im vorliegenden Fall ist dies Gadolinium (Gd), bestückt ist und durch mehrere feststehenden Permanentmagnete rotiert (vgl. Abb. 1). Im Unterschied zu früheren Anlagen wird der Rotor von einem Stator umschlossen und es liegt eine axiale (vertikale) Durchströmung der Rotorsegmente vor, sodass das Fluid nach der Durchströmung des Rotors gezielt abgeführt werden kann. Dies ermöglicht unter anderem die Fluidtrennung, d. h. eine Separierung vom warmen bzw. kalten Wasser, was theoretisch die Nachschaltung einer weiteren Stufe (Kaskadierung) zulassen würde. Der vorliegende Aufbau beschränkt sich allerdings auf eine einzelne Stufe, wobei aufgrund der vollständigen Instrumentierung die potenzielle Kaskadierung anhand der Messdaten rechnerisch beurteilt werden kann. Da es sich primär um eine Laboranlage handelt und die energetische Bilanzierung im Vordergrund steht, werden sämtliche Fluidströme im Rücklauf wieder zusammengeführt und gemeinsam abgeleitet. In Abb. 4 ist der Gesamtaufbau mit den Flanschanschlüssen der Zuleitungen (oben) und der Rückleitung (unten) dargestellt. Der Rotor wird vertikal von oben nach unten durchströmt. Der Rotor mit den magnetokalorischen Wärmetauscher-Segmenten (Gd) ist nicht direkt sichtbar, da er vom Stator bzw. den Magneten umschlossen ist. Mit dem angekoppelten Elektromotor kann der TMM sowohl angetrieben als auch gebremst werden bzw. im Generatorbetrieb elektrische Leistung erzeugt werden, was für die Beurteilung der elektrischen Nettoleistung entscheidend ist.

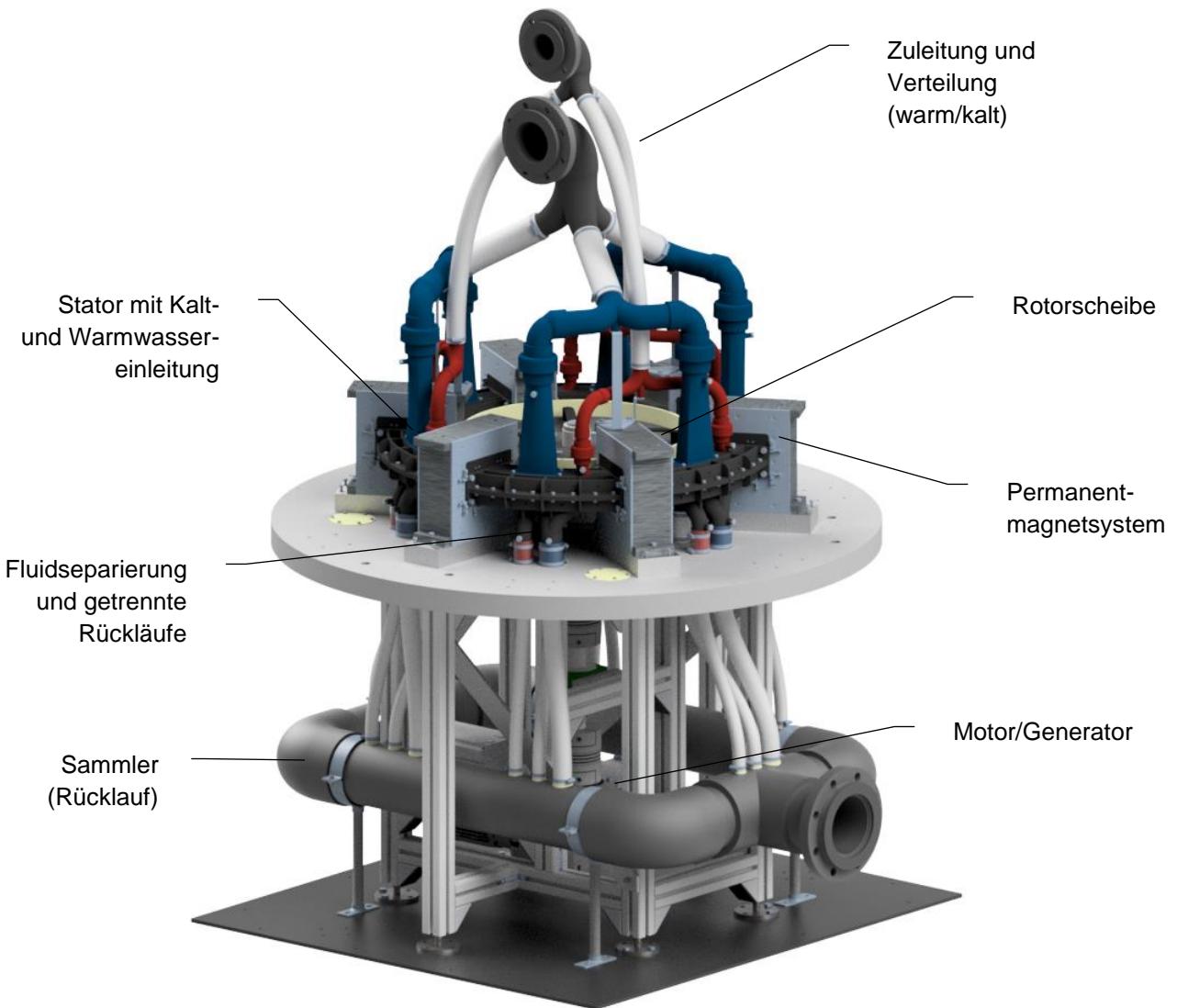
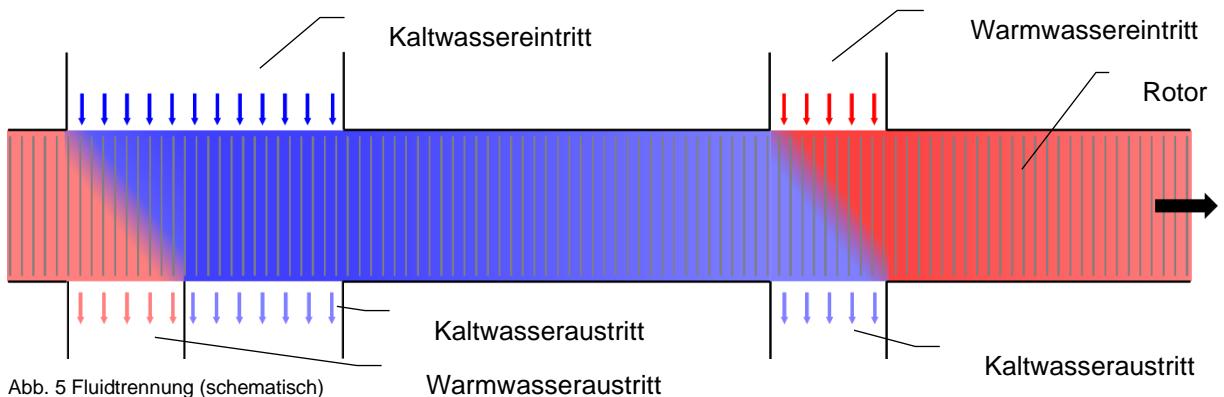


Abb. 4 CAD-Gesamtaufbau des TMM K2

In Abb. 6 ist ein einzelner Zyklus (Magnet bis Magnet) in einer Schnittansicht dargestellt, damit man das Zusammenspiel von Rotor und Stator nachvollziehen kann. Links und rechts ist jeweils eine Hälfte der Magnetbaugruppe erkennbar und dazwischen die Statorkomponente mit Kalt- bzw. Warmwasserdurchströmung. Aufgrund der unterschiedlichen Durchflussmengen sind die Düsenquerschnitte nicht identisch und bei der Kaltwasserdurchströmung ist ein zweigeteilter Rücklauf erforderlich (\rightarrow Fluidtrennung). Dies ist in Abb. 5 illustriert, wobei zu erkennen ist, dass aufgrund der breiteren Kaltwassereindüsung, eine zweigeteilte Abführung nötig ist, da einerseits anfänglich das im Rotor stehende warme Wasser ausgestossen werden muss und andererseits danach das Kaltwasser durchströmt und austritt. Die unterschiedlichen Durchflussmengen sind auf die Materialeigenschaften von Gd zurückzuführen (da die CURIE-Temperatur von Gd nicht mittig zwischen der Warm- und Kaltwassertemperatur liegt, ist ein deutlich gröserer Kaltwasservolumenstrom vorteilhaft).



Ebenfalls gut zu erkennen in Abb. 6 ist, dass die Warmwasserdurchströmung innerhalb des Magneten erfolgt und entsprechend mit einem Zielkonflikt zwischen Magnetfeldverlust durch Aussparungen im Magnetmaterial und Druckverlust durch kleine Strömungsquerschnitte verbunden ist. Darauf wird in Abschnitt 4 noch detaillierter eingegangen.

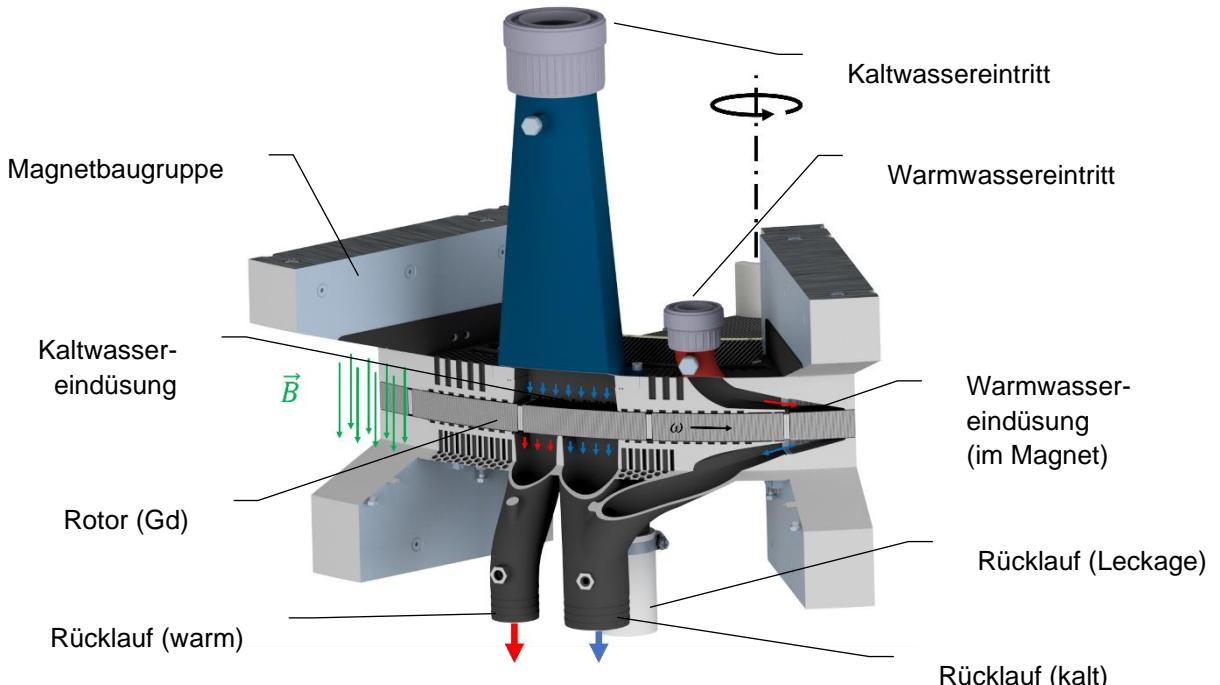


Abb. 6 CAD-Schnittansicht eines Zyklus mit den entsprechenden Fluidströmen

Durch die geschlossene Fluidführung (geschlossener Stator) ist der Rotor mit den Wärmetauschersegmenten im Idealfall immer vollständig gefüllt (warm bzw. kalt) und es befindet sich keine Luft im System. Ein Einströmen von Fluid in den Rotor ist stets mit einem Ausstossen von Fluid aus dem Rotor verbunden (Füllungswechsel), wobei Menge und Temperatur des austretenden Fluids durch die Massen- und Energiebilanz definiert sind.

3 Vorgehen und Methode

Das TMM K2-Entwicklungsprojekt wurde in fünf Phasen gegliedert, welche jeweils mit einem Meilenstein abgeschlossen wurden. In den ersten beiden Phasen ging es um die Konzeptfindung und die Entwicklung der einzelnen Teilkomponenten. Danach folgten Baugruppentests bzw. eine erste Testphase, um den Konzeptentscheid anhand experimenteller Vortests bestätigen zu können. In den weiteren Phasen, auf welche sich die Förderung durch das BFE hauptsächlich bezieht, stand das finale Design der Komponenten sowie der Gesamtaufbau im Vordergrund und schliesslich die Umsetzung, welcher die Inbetriebnahme und anschliessend die Kennfeldmessung bzw. Modellvalidierung folgte.

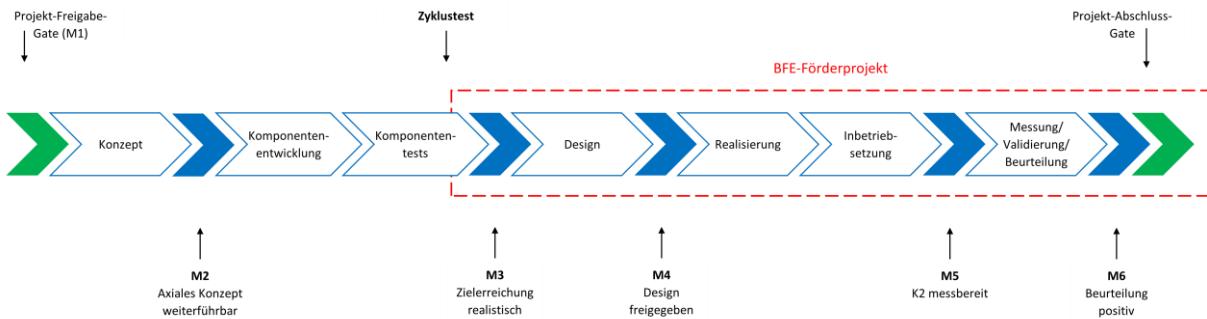


Abb. 7 Projektphasen und Meilensteine (Zeitdauer: März 2020 bis März 2022)

Zusammenarbeit mit Forschungspartnern

Aufgrund der beschränkten Ressourcen bei SBE war die Unterstützung durch die FHNW essenziell für die erfolgreiche Durchführung des vorliegenden Entwicklungsprojektes. Die Expertise der FHNW und insbesondere das theoretische wie auch experimentelle Knowhow in den Bereichen Strömungsmechanik und Thermodynamik brachte das Projekt entscheidend voran. Durch die umfassende Infrastruktur und Simulationsmöglichkeiten an der FHNW waren vertieferte Untersuchungen möglich als dies für SBE anderweitig möglich gewesen wäre. Im Abschnitt 4.2 sind die relevanten Arbeitspakete aufgeführt, welche seitens der FHNW durchgeführt wurden und den internen Entwicklungspfad bei SBE unterstützten.

Parallel zum TMM K2-Entwicklungsprojekt ist SBE in ein Materialentwicklungsprojekt an der *Technischen Universität Delft* (TU Delft) involviert, in welchem magnetokalorische Materialien erforscht bzw. entwickelt werden, welche in zukünftigen Generationen des TMM zur Anwendung kommen sollen. Die Materialentwicklung hat aufgrund des längeren Zeithorizontes (Grundlagenforschung) keinen direkten Einfluss auf das TMM K2-Entwicklungsprojekt, ist für SBE aber sehr relevant, da das aktuell verwendete Material (Gd) aus Effizienz- und Kostengründen in naher Zukunft abgelöst werden muss durch ein alternatives magnetokalorisches Material, welches technisch und wirtschaftlich bessere Voraussetzungen bietet für kommerzielle Anwendungen der TMM-Technologie.

Definition der Kennzahlen (Zielgrößen)

Die Beurteilung der Zielerreichung erfolgte primär anhand von Kennfeldmessungen bei den festgelegten Randbedingungen (Temperaturen, Volumenströme) und den daraus abgeleiteten Kenngrößen. Dabei handelt es sich vorrangig um die erzielte **elektrische Nettoleistung**¹ $P_{el,net}$ bzw. das *Back Work Ratio (BWR)*, wobei die folgenden Definitionen verwendet werden.

$$P_{el,net} = P_{el} - P_{pump} - \frac{P_{ctrl}}{\eta_{ctrl}} = P_{mech} \cdot \eta_{gen} - \frac{\dot{V}_h \cdot \Delta p_h + \dot{V}_c \cdot \Delta p_c}{\eta_{pump}}$$

¹ Für die aufgenommene elektrische Leistung (Eigenverbrauch des TMM K2) wird hier nur die Pumpleistung berücksichtigt, da die übrigen Verbraucher (Prüfstandssteuerung, Messtechnik etc.) in einem vernachlässigbaren Bereich liegen.



$$\text{BWR} = \frac{P_{pump}}{P_{mech}}$$

P_{ctrl}	Leistung zusätzlicher Verbraucher (Steuerung, Messtechnik, ..)	[W]
P_{el}	elektrische Bruttoleistung	[W]
P_{mech}	mechanische Bruttoleistung (Wellenleistung)	[W]
P_{pump}	Pumpleistung	[W]
\dot{V}_h, \dot{V}_c	Volumenstrom (warm/kalt)	[m³/s]
$\Delta p_h, \Delta p_c$	Gesamtdruckverlust (warm/kalt)	[Pa]
η_{gen}	Generatorwirkungsgrad	[·]
η_{pump}	Pumpenwirkungsgrad	[·]

Als sinnvolle Definition für einen **effektiven Wirkungsgrad** η_{eff} des TMM-Prozesses bietet sich das Verhältnis von mechanischer Nettoleistung zum entnommenen Wärmestrom aus dem warmen Fluidstrom an. Dies erfordert die Messung der Vorlauf- bzw. Rücklauftemperatur des warmen Fluidstromes. Ein Wirkungsgradziel wurde nicht explizit festgelegt, da dies unter Umständen einen Zielkonflikt mit dem Nettoleistungsziel verursacht hätte (grobe Schätzungen für den Wirkungsgrad bewegten sich um etwa 0.1 %).

$$\eta_{eff} = \frac{P_{mech,net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{P_{mech} - P_{pump}}{\dot{m}_h \cdot (h_{h,in} - h_{h,out})}$$

\dot{Q}_{in}	zugeführter Wärmestrom (mit Stufenaustrittstemperatur berechnet)	[W]
$P_{mech,net}$	mechanische Nettoleistung	[W]
$h_{h,in}, h_{h,out}$	spez. Enthalpie Warmwasser (Vorlauf/Rücklauf)	[J/kg]
\dot{m}_h	Massenstrom (Warmwasser)	[kg/s]

Um einen Bezug zum CARNOT-Wirkungsgrad η_c als theoretische Obergrenze für den thermischen Wirkungsgrad herstellen zu können, wird der TMM-Gütegrad ν_{TMM} definiert. Das obere bzw. untere Temperaturniveau für den CARNOT-Wirkungsgrad stellen dabei die Vorlauftemperaturen der Abwärme bzw. des Kühlwassers dar.

$$\nu_{TMM} = \frac{\eta_{eff}}{\eta_c} = \frac{\eta_{eff}}{1 - \frac{T_c}{T_h}}$$

T_h, T_c	Eintrittstemperaturen (Vorlauf) des warmen/kalten Fluids	[K]
η_c	CARNOT-Wirkungsgrad	[·]

Für die Beurteilung der Fluidtrennung wurde der **Fluidtrennungswirkungsgrad** η_{FT} definiert, der die verbleibende Temperaturdifferenz am Austritt der Stufe der theoretisch berechneten gegenüberstellt. Dabei wurde zahlenmäßig kein Zielwert festgelegt, sondern lediglich, dass eine quantitative Beurteilung der Fluidtrennung ermöglicht werden soll. Die untenstehende Definition wurde dementsprechend auch nicht zu Projektbeginn definiert, sondern ist erst während der Konzeptphase entstanden (andere Bewertungen der Fluidtrennung wären ebenfalls denkbar).

$$\eta_{FT} = \frac{\Delta T^{(meas)}}{\Delta T^{(calc)}} = \frac{T_{h,out}^{(meas)} - T_{c,out}^{(meas)}}{T_{h,out}^{(calc)} - T_{c,out}^{(calc)}}$$

$T_{h,out}, T_{c,out}$	Statoraustrittstemperatur (warm/kalt)	[K]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]
(meas)	gemessen	
(calc)	berechnet (aus Berechnungsmodell <i>SimBlue2</i>)	

4 Ergebnisse und Diskussion

Der folgende Abschnitt ist unterteilt in drei Teile, wobei im ersten Teil das Gesamtentwicklungsprojekt sowie die übergeordnete Zielerreichung im Vordergrund steht. Im zweiten Teil wird auf die spezifischen Arbeitspakete eingegangen, welche seitens der FHNW ausgeführt wurden und den Schwerpunkt des vorliegenden Förderprojektes darstellen. Abschliessend werden im dritten Teil die Ergebnisse bzw. der Stand der laufenden Arbeiten in der Materialentwicklung seitens TU Delft (Materialforschungsprojekt) präsentiert, welche parallel zu den anderen Arbeiten liefen und vor allem für zukünftige Entwicklungen im Bereich der TMM-Technologie relevant sein werden.

4.1 TMM K2-Entwicklung (SBE)

4.1.1 Konzept

Als wesentliche Konzeptänderung beim TMM K2 gegenüber früheren Anlagen kann die axiale (vertikale) Durchströmung des Rotors erwähnt werden. Diese hat den Vorteil, dass die Strömungsrichtung parallel zur magnetischen Flussdichte der Permanentmagnete liegt und dadurch die Höhe des Magnetspaltes und die Länge der Strömungskanäle direkt gekoppelt sind. Dies ist vorteilhaft in Bezug auf den grundlegenden Zielkonflikt zwischen möglichst rascher Erwärmung bzw. Kühlung des magnetokalorischen Materials und dem dafür in Kauf zu nehmendem Druckverlust, welcher in die aufzuwendende Pumpleistung fliesst und damit die Nettoleistung direkt reduziert. Eine zweite wichtige Änderung gegenüber dem Vorgänger TMM K1 besteht in der geschlossenen Fluidführung und in der Fluidtrennung, d. h. der Separierung der durch den Rotor strömenden kalten bzw. warmen Fluidströme. Dies erfordert einen umschlossenen Rotor mit entsprechenden Strömungsführungen für den Zu- bzw. Ablauf und entsprechende Dichtungen zwischen den Rotor- und Statorkomponenten, um einerseits die Leckage und andererseits die Vermischung von warmem und kaltem Fluid zu minimieren. In Abb. 8 ist dies schematisch dargestellt, wobei die Strömungsrichtung von oben nach unten und die Drehrichtung des Rotors (Wärmetauschersegmenten) von links nach rechts verläuft.

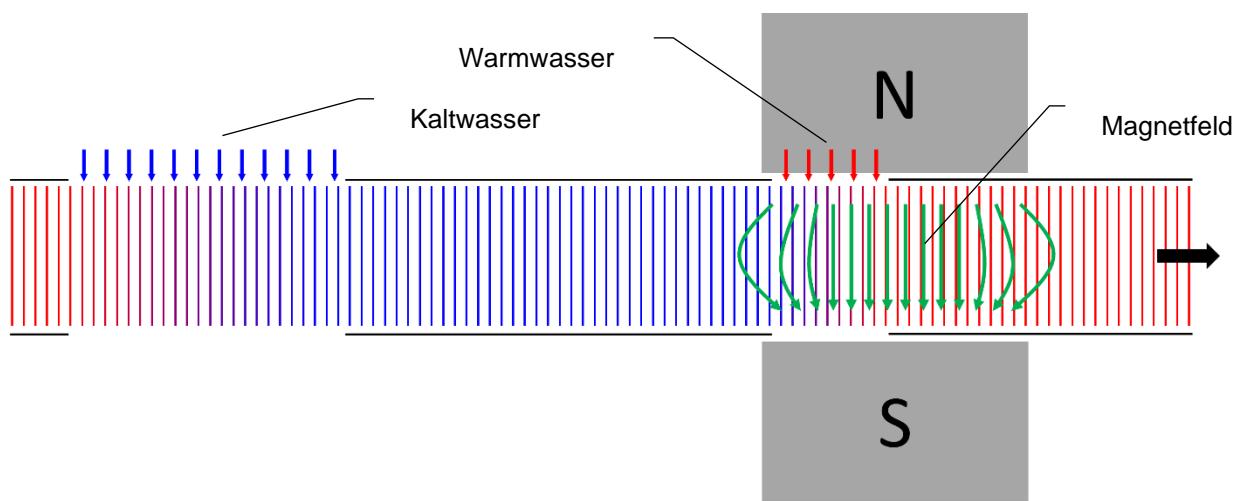


Abb. 8 Axiale Durchströmungsrichtung (parallel zu magnetischer Flussdichte)

4.1.2 Komponentenentwicklung

Anhand der unter 4.1.1 erwähnten konzeptionellen Anforderungen konnten die Einzelkomponenten entwickelt werden. Sämtliche Kernkomponenten (Rotor mit Wärmetauschersegmenten, Permanentmagnetsysteme, Statorbaugruppen mit Fluidführungen) mussten von Grund auf neu entwickelt werden, wobei das parallel dazu aufgebaute Parametermodell (*SimBlue2*) die Grobauslegung und Abstimmung der

Einzelkomponenten bzw. erste Abschätzungen der resultierenden Leistung ermöglichte. In sämtlichen Bereichen konnte vom Knowhow aus vergangenen Entwicklungsprojekten bzw. Erfahrungen mit früheren Anlagen profitiert werden. In Abschnitt 4.2 wird näher auf einige Kernkomponenten bzw. deren Entwicklung eingegangen, u. a. auf die Entwicklung der Permanentmagnetsysteme, welche mittels Magnetostatik-Simulationen seitens der FHNW unterstützt wurde. Aufgrund der vertikalen Wärmetauscherdurchströmung war u. a. die Wärmetauscheraufnahme (vgl. Abb. 10) zentral und besonders die Warmwasserdurchströmung innerhalb des Magnetfeldes war eine grosse Herausforderung (vgl. Abb. 9).

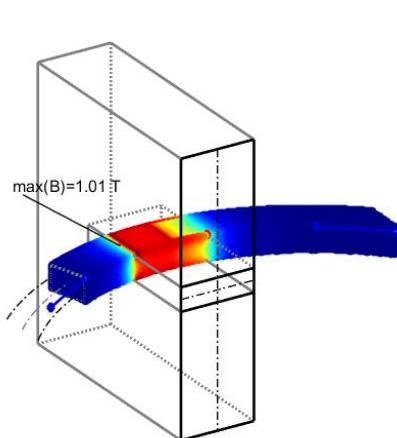


Abb. 9 Vereinfachte Magnetgeometrie mit B-Feld im Berechnungsmodell

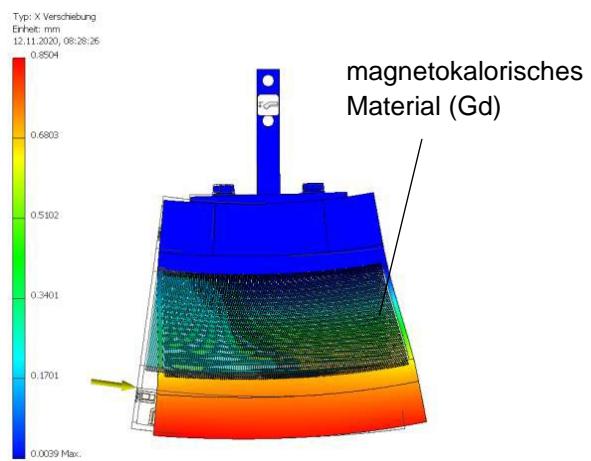


Abb. 10 FEM-Analyse eines axial durchströmten Rotorsegmentes (Erste Version)

4.1.3 Komponententests

Von Beginn an wurde darauf geachtet, die Berechnungen bzw. die Komponentenauslegungen nach Möglichkeit in Vorversuchen experimentell validieren zu können und schliesslich auch das Zusammenspiel im Gesamt- oder Teilverbund testen zu können. Dazu wurde explizit eine Testphase geplant, um den weiteren Projektverlauf gegebenenfalls anpassen zu können.

In Abb. 11 ist die Statorbaugruppe abgebildet, wobei die Strömungsführung aufgrund des additiven Fertigungsverfahrens (3D-Druck) und unterstützend durch Strömungssimulationen (vgl. 4.2.2) optimal gestaltet werden konnte, um Druckverluste im Zu- und Rücklauf auf ein Minimum reduzieren zu können. Aufgrund der eingeschränkten Materialwahl beim 3D-Druck war anfänglich unklar, ob thermische Verformungen zu Problemen führen könnten, weshalb diesbezüglich numerische Simulationen (Thermomechanik) seitens der FHNW durchgeführt wurden.



Abb. 11 Erste Version der zweigeteilten Statorbaugruppe mit Zu- und Abführungen für die Fluidströme

4.1.4 Design- und Realisierungsphase

Nach den erfolgreichen Komponenten- und Baugruppentests folgte die Designphase, in welcher sämtliche Komponenten anhand der Erkenntnisse aus den oben erwähnten Vortests und z. T. vertiefteren theoretischen Untersuchungen angepasst wurden und das finale Design erhielten. Diese Projektphase profitierte besonders von der Unterstützung durch die FHNW, da für die Detailauslegung nahezu aller Komponenten gezielte Simulationen nötig waren, für welche das Knowhow und die nötigen Tools bei SBE fehlen.

- Magnetostatik-Simulation für die detaillierte Gestaltung der Permanentmagnete
- Strömungssimulation (CFD) der Stator-Baugruppe (Zuleitung bzw. Abführung der Fluidströme)
- CFD-Simulation der Rotordurchströmung²
- Thermomechanik-Simulation zur Bestimmung der Verformungen des Stators

Aufgrund der Komplexität des TMM-Prozesses, besonders aufgrund des transienten Wärmeaustausches zwischen den rotierenden Wärmetauschersegmenten und den Fluidströmen, resultieren ebenfalls sehr anspruchsvolle Simulationen. Wiederum sei auf Abschnitt 4.2 verwiesen für detailliertere Informationen zu den spezifischen Arbeitspaketen, welche zusammen mit der FHNW durchgeführt wurden. Parallel dazu wurde das Berechnungsmodell *SimBlue2* mit allen neuen Erkenntnissen für die finale Auslegung laufend aktualisiert.

² An dieser Stelle sei auf das vorangegangene BFE-Förderprojekt «*Entwicklung einer Pilotanlage des Thermo-Magnetischen Motors (TMM) zur Umwandlung von Niedertemperatur-Abwärme unter 80 °C in emissionsfreie Elektrizität – CFD Simulationen*



Abb. 12 Kompletaufbau des TMM K2 in 20 ft-Container

4.1.5 Inbetriebnahme und Messbetrieb

Vor dem vollständigen Gesamtaufbau wurden Testmessungen an einem Teilaufbau durchgeführt, um allfällige kleinere Modifikationen für den definitiven Aufbau umsetzen zu können. Dies führte zu einigen Optimierungen an der Stator-Baugruppe und bot wiederum wertvolle Validierungsmöglichkeiten für das Berechnungsmodell *SimBlue2*. Anhand von schnellen Temperaturmessungen im Rotor (siehe 4.2.3) konnte z. B. festgestellt werden, dass die Durchströmung im Bereich der Kaltwasserdüse nicht optimal ist in Bezug auf die gleichmässige Verteilung über dem Düsenquerschnitt. Dies konnte anschliessend mit einer angepassten Version der Stator-Baugruppe verbessert werden.

Als primäre Zielgrösse wurde die elektrische Nettoleistung festgelegt (vgl. 1.3), welche als Differenz zwischen der erzeugten elektrischen Leistung (Generatorleistung) und der benötigten Aufnahmeleistung (Pumpleistung) definiert ist. Da es sich beim TMM K2 um eine Laboranlage handelt, wurden Pumpen- bzw. Generatorwirkungsgrad geschätzt ($\eta_{pump} = \eta_{gen} = 85\%$).

$$P_{el,net} = P_{mech} \cdot \eta_{gen} - P_{pump} \approx 531 \text{ W}$$

In Tab. 1 sind die relevanten Messgrössen für den oben dargestellten Leistungsbestpunkt (elektrische Nettoleistung = 531 W) zusammengestellt. Sämtliche Messdaten bzw. Kenngrössen beziehen sich auf diesen Betriebspunkt und wurden im stationären Betrieb erfasst.

Drehzahl	Drehmoment	Leistung (mech.)	Temperatur (warm/kalt)	Volumenstrom (warm/kalt)	Druckverlust ³ (warm/kalt)	Pumpleistung	Nettoleistung (mech.)
<i>n</i> [1/min]	<i>M</i> [Nm]	<i>P_{mech}</i> [W]	<i>T_h, T_c</i> [°C]	<i>V̄_h, V̄_c</i> [m ³ /h]	<i>Δp_h, Δp_c</i> [mbar]	<i>P_{pump}</i> [W]	<i>P_{mech,net}</i> [W]
33.3	201	701	60.5 / 12.9	16.1 / 40.1	58.2 / 26.2	64.4	637

Tab. 1 Zusammenstellung der wichtigsten Messdaten (Leistungsbestpunkt)

³ Im Vergleich zum TMM K1 (beim Leistungsbestpunkt) konnten die Druckverluste ungefähr um den Faktor 50 reduziert werden (da beim TMM K1 keine Nettoleistung erzeugt wurde, wurden die Druckverluste damals i. Allg. nicht berücksichtigt).

Aufgrund der Materialeigenschaften von Gd (CURIE-Temperatur T_c im Bereich von 19 °C) hat generell die Kaltwassertemperatur einen dominierenden Einfluss auf die resultierende Leistung, d. h. eine tiefere Kaltwassertemperatur führt allgemein zu einer höheren Leistung. Aufgrund des sehr breiten Übergangsgebietes von Gd gilt dies auch, aber deutlich weniger ausgeprägt, für eine höhere Warmwassertemperatur. Da die Eintrittstemperaturen (Randbedingungen) beim vorliegenden Setup nicht variiert werden können, waren diesbezüglich allerdings keine Variationsmessungen möglich. In Bezug auf die Durchflussmengen wurden bereits die maximal möglichen Volumenströme für die Auslegung verwendet, d. h. es war keine Erhöhung der Volumenströme möglich. Da mit zunehmendem Durchfluss auch die Druckverluste und damit die Pumpleistung zunehmen, ist eine Erhöhung der Durchflussmenge i. Allg. nicht mit einer Erhöhung der Nettoleistung verbunden. Bei den Messungen wurde primär die Drehzahl variiert, um das Leistungsmaximum bestimmen zu können (vgl. Abb. 13).

Trotz diverser kleinerer Anpassungen konnte das angestrebte Leistungsziel von 1 kW (elektrisch) nicht erreicht werden, u. a., weil sich einige Annahmen im Berechnungsmodell als zu optimistisch herausstellten und angepasst werden mussten. Schliesslich resultierte eine elektrische Nettoleistung von etwa 530 W und mit den validierten Modellparametern konnte letztendlich eine gute Übereinstimmung zwischen Modell (*SimBlue2*) und Messdaten erreicht werden. In Abb. 13 ist das Kennfeld dargestellt, wobei die elektrische Nettoleistung und das Drehmoment (~ mech. Leistung) über der Drehzahl aufgetragen sind. Die Abweichungen zwischen Modell und Messung liegen im Bereich von ca. 10 %.

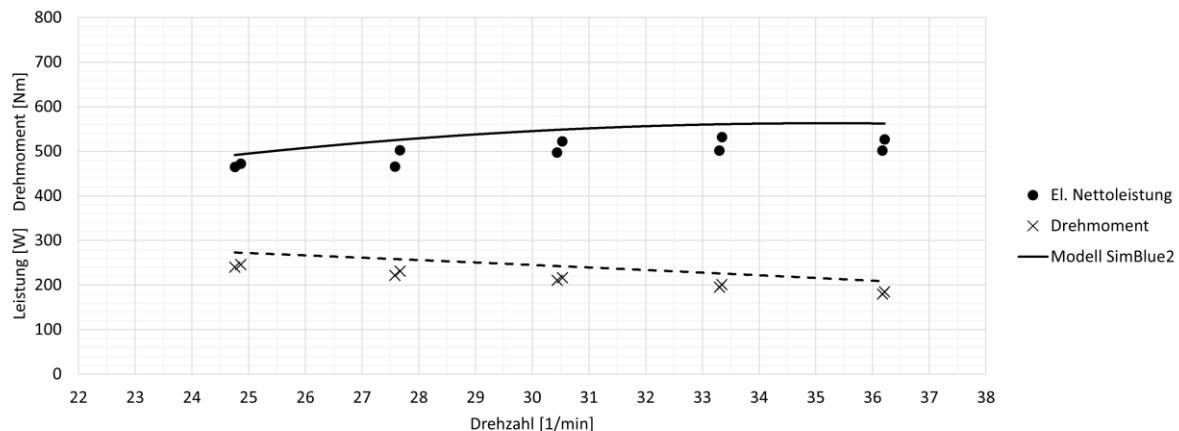


Abb. 13 Kennfeldmessung TMM K2

Obwohl das Leistungsziel nicht ganz erreicht wurde, ist insbesondere die erreichte Übereinstimmung zwischen Messung und Auslegung/Modell für SBE ein grosser Erfolg, da dies zeigt, dass die relevanten Einflussgrössen bzw. die grundlegenden physikalischen Effekte im Berechnungsmodell grundsätzlich korrekt abgebildet werden und damit das Verständnis des komplexen TMM-Prozesses auf einem sehr fortgeschrittenen Stand ist. Dies kann hinsichtlich zukünftiger Entwicklungsschritte und in Bezug auf den Knowhow-Aufbau als sehr positiv eingestuft werden.

Der Fortschritt in Bezug auf die Nettoleistung kann anhand des BWR aufgezeigt werden, der nun erstmals deutlich kleiner als 1 ist. Dies bedeutet, dass von der erzeugten Bruttoleistung nur noch ein Bruchteil für den eigenen Betrieb des TMM benötigt wird. Im Vergleich zum TMM K1 konnte diese Kennzahl um mehr als eine Grössenordnung reduziert werden.

$$\text{BWR} = \frac{P_{\text{pump}}}{P_{\text{mech}}} \approx 0.1 \quad (\text{TMM K1: BWR} \approx 3)$$

Der effektive TMM-Wirkungsgrad wird mit der mechanischen Nettoleistung und der dem warmen Fluidstrom entnommenen Wärmeleistung berechnet (vgl. $T_{h,in}$ bzw. $T_{h,out}$ in Abb. 14).



$$\eta_{eff} = \frac{P_{mech,net}}{\dot{Q}_{in}} \approx \frac{637 \text{ W}}{419 \text{ kW}} = 0.15 \%$$

Bezogen auf den CARNOT-Wirkungsgrad η_c mit $T_h = 333.7 \text{ K} (= 60.5 \text{ }^\circ\text{C})$ und $T_c = 286.1 \text{ K} (= 12.9 \text{ }^\circ\text{C})$, der die obere Grenze für den thermischen Wirkungsgrad für zwei gegebene Temperaturniveaus darstellt, kann der TMM-Gütegrad ν_{TMM} definiert werden. T_h bzw. T_c entsprechen dabei den Vorlauftemperaturen der nutzbaren Abwärme bzw. des Kühlmittels und ergeben damit das maximal mögliche Temperaturgefälle.

$$\nu_{TMM} = \frac{\eta_{eff}}{\eta_c} \approx \frac{0.15 \%}{14.3 \%} = 1 \%$$

Der Wirkungsgrad bzw. die Leistungsdichte des TMM K2 fällt erwartungsgemäss gering aus, was vor allem auf das verwendete magnetokalorische Material (Gd) zurückzuführen ist. Deutliche Wirkungsgrad- und Leistungssteigerungen werden daher primär durch den Einsatz von alternativen Materialien und spezifisch optimierten Prozessen möglich werden (vgl. 4.3).

Da sämtliche Temperaturen am Statoreintritt und -austritt gemessen werden (vgl. Abb. 14), kann auch die Fluidtrennung beurteilt werden, wozu ein entsprechender Fluidtrennungswirkungsgrad η_{FT} definiert wurde. Angesichts der Tatsache, dass die Fluidtrennung nicht oberste Priorität genoss und dafür verhältnismässig wenig Entwicklungsaufwand investiert wurde, kann der resultierende Wert als gut eingestuft werden und festgehalten werden, dass der angewendete Ansatz der Fluidtrennung im Wesentlichen funktioniert. Damit wäre es prinzipiell möglich, eine zweite Stufe (Rotor) nachzuschalten, um das verbleibende Temperaturgefälle weiter nutzen zu können (Kaskadierung). Mit Gd als Arbeitsmaterial hat dies jedoch nur eine untergeordnete Bedeutung für die Praxis, mit den zukünftig verwendeten Materialien wird die Mehrstufigkeit allerdings eine grosse Relevanz erhalten (vgl. 4.3).

$$\eta_{FT} = \frac{\Delta T^{(meas)}}{\Delta T^{(calc)}} = \frac{37.8 \text{ }^\circ\text{C} - 19.3 \text{ }^\circ\text{C}}{44.7 \text{ }^\circ\text{C} - 16.5 \text{ }^\circ\text{C}} \approx 66 \%$$

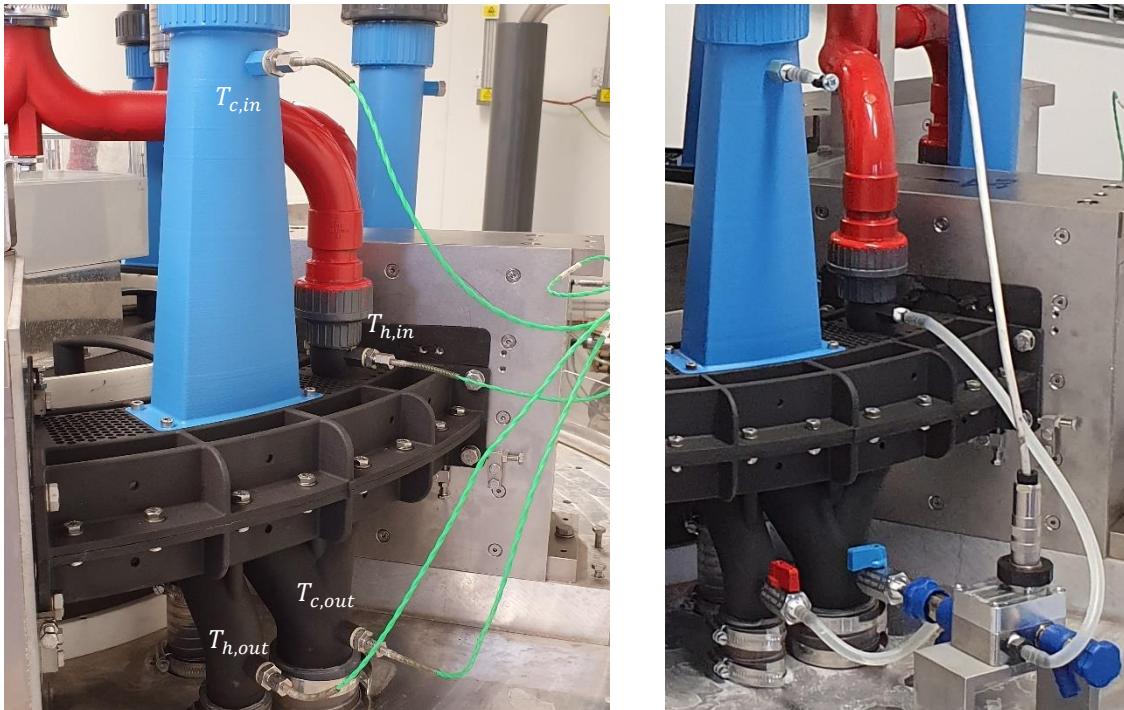


Abb. 14 Temperaturmessungen (links) bzw. Differenzdruckmessungen (rechts) an den Statorschnittstellen für die Bilanzierung



Die in Abb. 14 abgebildeten Messanschlüsse können auch für Differenzdruckmessungen verwendet werden, um den Druckabfall über der Stufe zu messen bzw. die Stufe getrennt vom übrigen System (Zuleitungen, Verteiler, Rücklauf etc.) bilanzieren zu können. In Abb. 15 ist das Bilanzierungsschema dargestellt mit den beiden Systemen **TMM** (Gesamtbilanz) sowie **Stufe** (nur Ein- bis Austritt Stator).

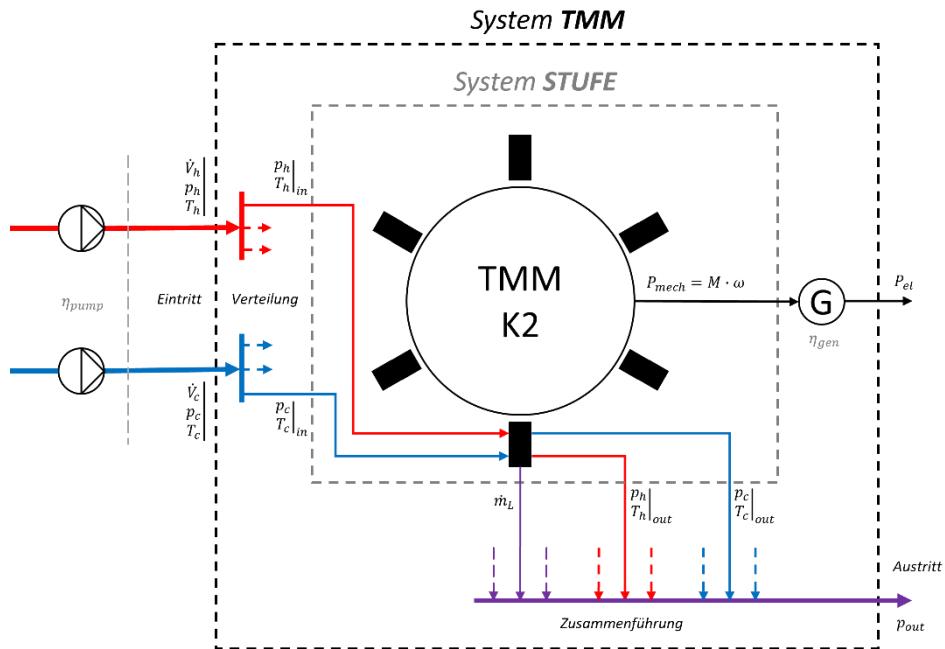


Abb. 15 Bilanzierungsschema

Dank der Weiterentwicklung der an der FHNW entwickelten Messtechnik für die transientes Temperaturmessungen (4.2.3) war es erstmals möglich, auch am finalen Gesamtaufbau mit Gd unter realen Betriebsbedingungen (mit Magnetfeld) dynamische Messungen der Material- und Fluidtemperaturen durchzuführen. Dies ermöglicht in Zukunft realistischere Validierungsfälle und aufwändige Umbauten bzw. spezielle Testaufbauten können dadurch vermieden werden.

4.2 Detailuntersuchungen (FHNW)

Im Folgenden soll etwas detaillierter auf jene Arbeitspakete eingegangen werden, welche an der FHNW ausgeführt wurden und durch die Förderung des BFE ermöglicht wurden.

4.2.1 Magnetostatik-Simulationen

Anhand des Magnetostatik-Analysesystems der Software ANSYS können durch Vorgabe der Koerzitivkraft und der remanenten Induktion der magnetischen Materialien, sowie der B-H-Kurven der magnetfeldleitenden Materialien die Magnetfelder simuliert werden. Solche Simulationen wurden durchgeführt, um Informationen zur Ausprägung des Magnetfelds im Magnetspalt zu erhalten.

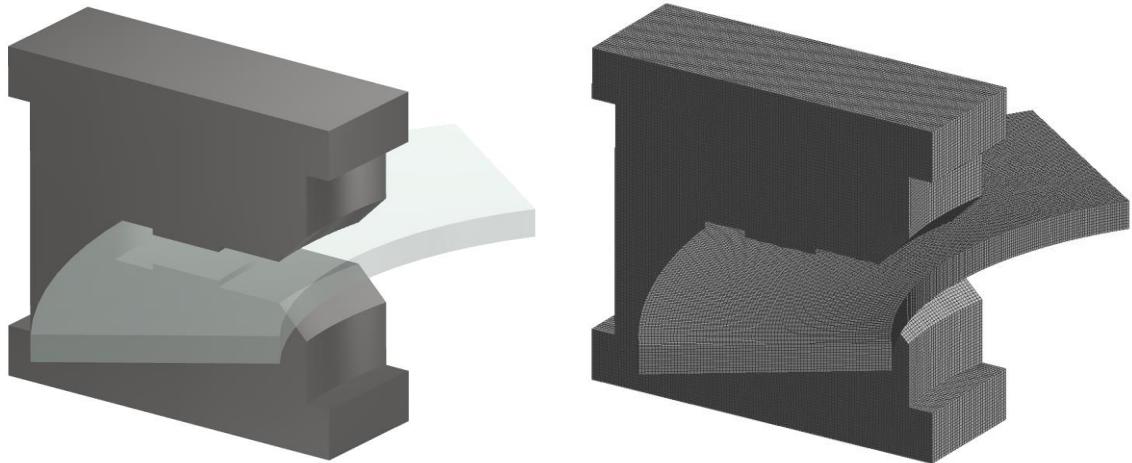


Abb. 16 Vereinfachte Baugruppe eines Permanentmagneten mit Auswertevolumen (links) und die entsprechende Vernetzung (rechts)

Abb. 16 zeigt eine vereinfachte Magnetgeometrie und deren Vernetzung für die Magnetostatik-Simulation. Gut zu erkennen ist das Auswertevolumen im Magnetspalt, wo sich normalerweise der Rotor befindet. In Abb. 17 wird das Magnetfeld (magnetische Flussdichte) innerhalb dieses Auswertevolumens anhand von zwei verschiedenen 3D-Ansichten dargestellt. Ein symmetrischer Aufbau eines solchen Magneten erzeugt ebenfalls ein symmetrisches und auf jeder Höhe fast einheitliches Magnetfeld.

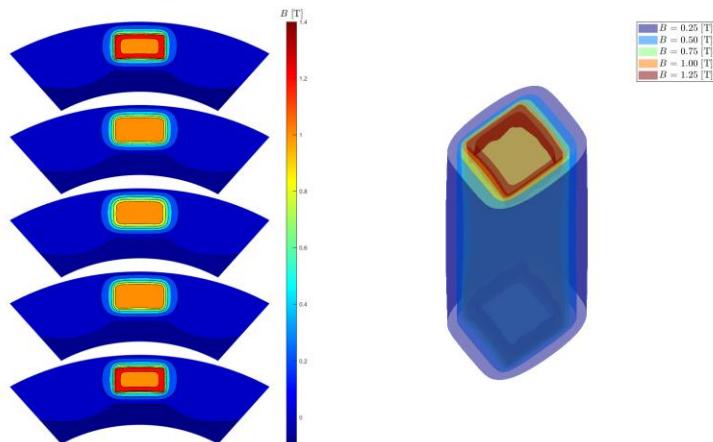


Abb. 17 3D-Visualisierung des Magnetfeldes im Magnetspalt (magnetische Flussdichte)

Im Rahmen der Realisierung des Demonstrators TMM K2 wurden auch die Permanentmagnete neu ausgelegt. Aufgrund der axialen Durchströmung des Rotors kommt die Warmwasserdüse genau dort zu liegen, wo innerhalb des Magneten nahezu die grössten Flussdichten des Magnetfeldes erwartet werden. Dies bedeutet, dass im magnetfeldleitenden Material Aussparungen vorgenommen werden müssen, um dort die Warmwasserdüse zu integrieren. Diese Aussparungen haben eine deutliche Beeinflussung des Magnetfeldes im Magnetspalt zur Folge. Die Ausprägung dieses Einflusses konnte anhand von den Simulationen quantifiziert werden und die entsprechenden Ergebnisse sind in Abb. 18 verdeutlicht. Man kann leicht erkennen, dass die seitliche Anordnung der Warmwasserdüse im Magnetmaterial eine asymmetrische Verteilung der Flussdichte (seitlich wie auch über die Höhe) zur Folge hat.

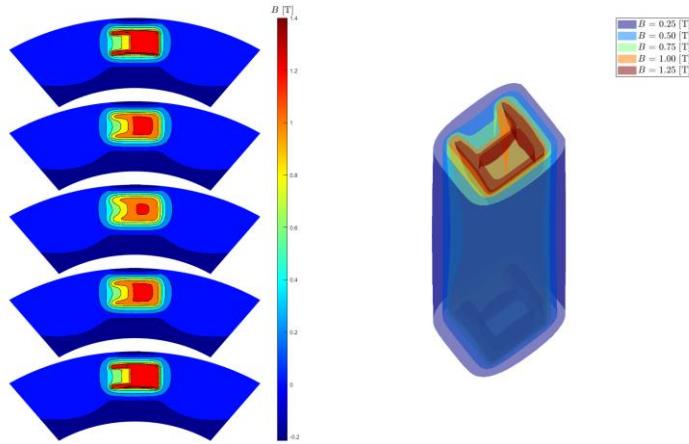


Abb. 18 3D-Visualisierung des Magnetfeldes mit modifizierter Geometrie

Es fand schliesslich eine Optimierung zwischen Magnetfeldeinbusse und Druckverlust der Düse statt. Die Magnetfelduntersuchungen wurden mit den Magnetostatik-Simulationen und die Druckverlustuntersuchungen anhand von CFD-Simulationen (vgl. 4.2.2) durchgeführt. Je grösser die Aussparung für die Düse gemacht wird, desto grösser sind die Auswirkungen auf das Magnetfeld. Andererseits werden die Druckverluste umso grösser, je weniger Raum man der Warmwasserdüse lässt. Eine Konfiguration mit möglichst wenig negativen Auswirkungen auf beiden Seiten wurde ermittelt und beim neuen Magnetdesign umgesetzt.

Die detaillierten Magnetfelddaten der Simulation wurden für SBE bereitgestellt, um damit das Berechnungsmodell *SimBlue2* zu speisen, welches sämtliche Vorgänge in der Maschine abbildet. Die genauen Magnetfeldverläufe sind besonders wichtig, um die Kräfte auf den Rotor zu berechnen und damit schliesslich die Bruttoleistung der Maschine zu ermitteln.

4.2.2 CFD-Simulationen

Warum waren im Rahmen dieses Projekts CFD-Berechnungen notwendig? Hierzu eine kurze Vorgeschichte, um die Zusammenhänge zu verstehen:

In einem vorgängigen Projekt wurden die Strömungen durch die Düsen simuliert, um die Druckverluste zu ermitteln. Insbesondere wurde die Warmwasserdüse untersucht, um dort ein gutes Verhältnis zwischen Druckverlust und Magnetfeldeinbusse zu finden. Die Problematik der Magnetfeldbeeinflussung aufgrund der Warmwasserdüse wurde bereits im Abschnitt 4.2.1 erläutert (vgl. auch Abb. 6). Neben dieser Optimierung hat sich in der Strömungssimulation auch gezeigt, dass es im Wirkungsbereich der Warmwasserdüse zu einer asymmetrischen Massenstromverteilung innerhalb des Rotors kommt. Dies kommt daher, dass das Warmwasser im Magnet umgelenkt werden muss und die Aussparung keilförmig gestaltet ist. In einem geringen Mass wurde dies auch erwartet, doch mit einer solch verzerrten Verteilung, wie sie in Abb. 19 dargestellt ist, hatte man nicht gerechnet.

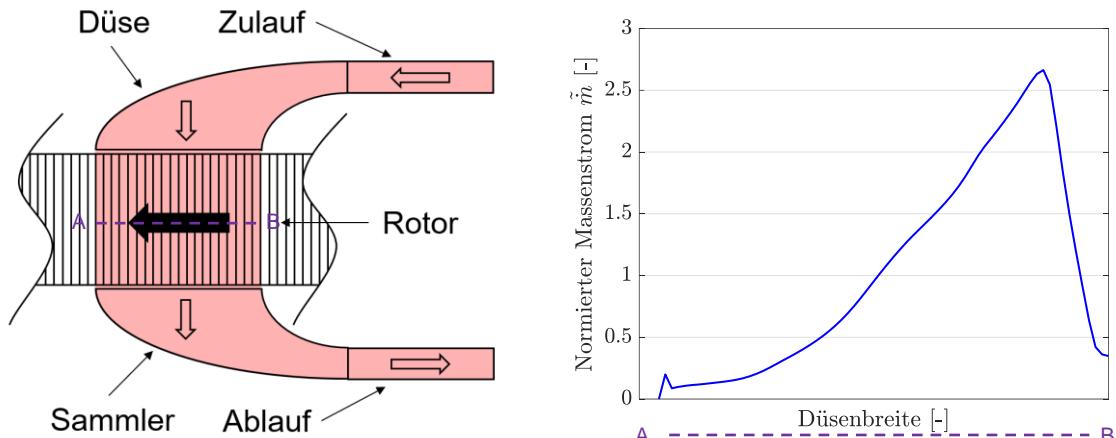


Abb. 19 Geometrie der Warmwasserdüse (links) und Massenstromverteilung im Nennbetrieb (rechts)

Im Gegensatz dazu wird im *SimBlue2*-Modell eine konstante Verteilung des Massenstroms angenommen, was nach den neusten Erkenntnissen einer deutlichen Diskrepanz zur Realität entspricht. Zu diesem Zeitpunkt konnte aber nicht abgeschätzt werden, wie gross der Einfluss von einem asymmetrischen Profil wirklich ist. Aus diesem Grund wurden dann neue CFD-Simulationen zur Hilfe gezogen, welche innerhalb dieses Projektes durchgeführt wurden. Das Ziel dieser Simulationen war es nun, den Einfluss von verschiedenen Eintrittsrandbedingungen (Strömungsprofilen) auf die Wärmeübertragung und schliesslich auf die Performance der Maschine zu ermitteln. Falls der Einfluss gravierend ausfallen sollte, hätte man genügend früh Massnahmen ergreifen können.

Um die Einflüsse auf die Wärmeübertragung ermitteln zu können, wird eine transiente Simulation der Vorgänge im Rotor benötigt. Eine Abbildung der gesamten Maschine mittels CFD-Simulationen war jedoch in diesem Rahmen nicht sinnvoll, da das Rechengebiet und dementsprechend auch das Netz viel zu gross ausfallen würde. Aus diesem Grund mussten gezielte Vereinfachungen angewendet werden, um eine solche Simulation in nützlicher Frist überhaupt ermöglichen zu können. Die Resultate einer solchen transienten CFD-Untersuchung können nicht nur für die vorhin erläuterte Sensitivitätsanalyse von Eintrittsrandbedingungen verwendet werden, sondern auch für eine Validierung des *SimBlue2*-Modells und für Abgleiche mit den Temperaturmessungen. Selbstverständlich müssen die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen dabei immer mitberücksichtigt werden. Eine Gegenüberstellung der Temperaturdaten aller verfügbaren Quellen (*SimBlue2*, CFD, Messungen) folgt in Abschnitt 4.2.4.

Modellierung und Randbedingungen

Wie bereits erwähnt, ist eine CFD-Simulation der gesamten Maschine in diesem Rahmen nicht sinnvoll. Man stelle sich vor, man müsste die gesamte Rotorgeometrie (360°) vernetzen, und zwar so fein, dass es für *Conjugate Heat Transfer* (CHT) geeignet ist. Dazu kämen noch Zuströmgebiete (Düsenströmungen) und evtl. der Rücklauf. Dies ergäbe ein riesiges 3D-Netz, wofür die vorhandenen Rechen- und Zeitressourcen nicht ausreichen würden, um Resultate in nützlicher Frist zu erhalten. Daher mussten drastische Idealisierungen vorgenommen werden. So wurde anstatt des gesamten Rotors nur ein kleiner Teil des Wärmetauschermaterials mit dem umliegenden Kanal in 2D vernetzt und später transient berechnet. Dabei wird das Material nicht bewegt, sondern fix an Ort und Stelle belassen. Dementsprechend müssen die Eintrittsrandbedingungen zeitlich so variiert werden, als würde sich der Wärmetauscher rotationsförmig durch den Zyklus bewegen (quasi eine Betrachtungsweise im Relativsystem des Wärmetauschers). Die Simulationsergebnisse stehen damit repräsentativ für den gesamten Rotor, da die zeitabhängigen Randbedingungen (RB) den vollständigen Zyklusdurchlauf abbilden.

Abb. 20 zeigt (links) schematisch den Zyklusdurchlauf, welcher simuliert werden soll und (rechts) das stark idealisierte Rechengebiet (2D), welches für die CFD-Simulationen gewählt wurde. Dieses besteht aus einem Materialbereich und einem umliegenden Kanal, respektive aus zwei Kanalhälften. Auf der Trennlinie des Kanals, also auf der linken und rechten Seite des Rechengebiets, wurde eine periodische

RB vorgegeben, d. h. alles was über diese Linie ausströmt, strömt auf der anderen Seite wieder ins Rechengebiet ein und umgekehrt. Da die Dimensionen in tangentialer Richtung im Verhältnis zur Düsenbreite klein sind, ist die Vorgabe dieser Periodizität durchaus gerechtfertigt. Vor dem Materialblock wurden zusätzlich Fluidblöcke platziert, um die Zuströmung realitätsnah zu erfassen. Zur Abbildung der Wärmeübertragung zwischen Fluid und Material (CHT) werden beide Phasen vernetzt und anschließend gekoppelt.

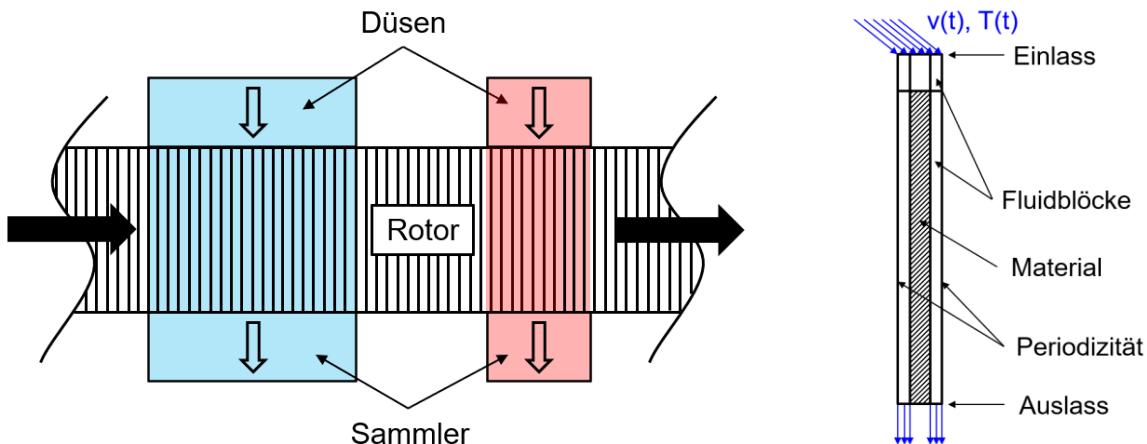


Abb. 20 Draufsicht eines Teils des Rotors (links) und qualitative Darstellung (Seitenansicht) des Rechengebietes (rechts)

Abb. 20 rechts veranschaulicht u. a. auch die transienten Eintrittsrandbedingungen. Immer wenn das Material - hypothetisch gesehen - an einer Düse vorbeikommt, so findet im Kanal eine Konvektion (Durchströmung) statt, welche am Eintritt eine drehzahlabhängige Inzidenz aufweist. Je nachdem vor welcher Düse sich das Material gerade befindet, wechselt die Temperatur zwischen dem hohen und dem tiefen Temperaturniveau.

Einerseits können die Eintrittsrandbedingungen nun beliebig vorgegeben werden und die Auswirkungen unterschiedlicher RB z. B. am Temperaturverlauf einer bestimmten Position am Wärmetauschersegment (Material) überprüft werden. Andererseits kann nun aus den CFD-Ergebnissen des Vorprojekts die Massenstromverteilung als Eintritts-RB vorgegeben werden, um so einen realitätsnahen Fall zu simulieren. Dieser «realistische» Fall wurde dann auch für die Validierung verwendet, wobei stets die erhöhte Unsicherheit und die getroffenen Annahmen/Idealisierungen beachtet werden müssen.

Vergleichsfälle

Es wurden fünf verschiedene Randbedingungen für die Geschwindigkeitsverteilung am Eintritt vorgegeben, um die Auswirkungen zu untersuchen (Sensitivitätsanalyse). Diese fünf Verläufe werden für einen vollständigen Zyklusdurchlauf in Abb. 21 dargestellt. Die «Peaks» auf der linken Seite stehen für die Strömung durch die Kaltwasserdüse und diejenigen auf der rechten Seite für die Warmwasserdüse. Die Kaltwasserdüse ist etwa doppelt so breit wie die Warmwasserdüse, aber weist dieselbe mittlere Geschwindigkeit auf. D. h. die Kaltwasserdüse benötigt etwa doppelt so viel Volumenstrom wie die Warmwasserdüse. Man kann sich nun vorstellen, dass der dargestellte Zyklus in der Simulation periodisch wiederholt wird, was in der Realität der Rotation des Materials durch die verschiedenen Gebiete (Kaltwasserdurchströmung – strömungsfreier Bereich – Warmwasserdurchströmung – etc.) entspricht.

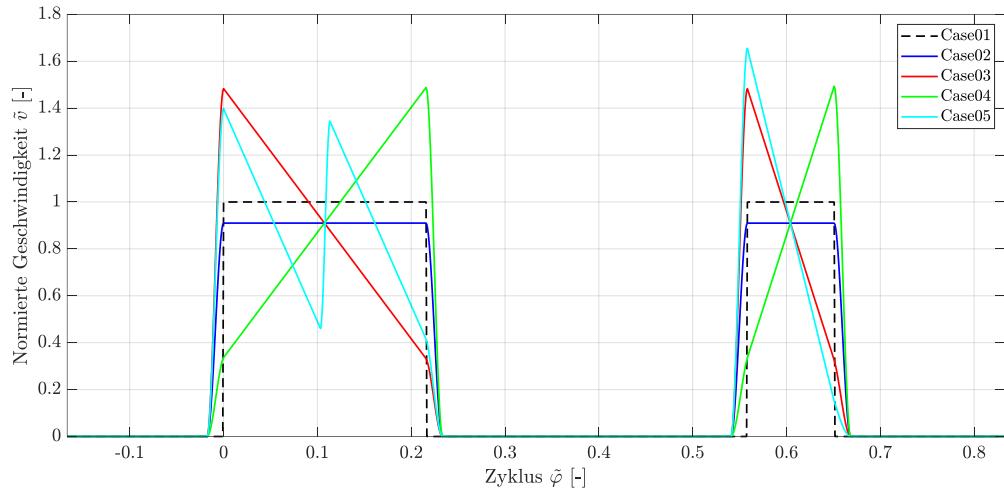


Abb. 21 Verschiedene Fälle der Geschwindigkeitsrandbedingungen am Eintritt

Es handelt sich einmal um die idealisierte Verteilung gemäss *SimBlue2*-Modell, welche eine Rechteckfunktion darstellt (Case01). Da solche schlagartigen Änderungen der Geschwindigkeit nicht realistisch sind und es bei der numerischen Berechnung zu Druckschlägen und weiteren Problemen kommt, wurde zusätzlich eine abgerundete Form dieser Rechteckfunktion getestet (Case02). Das Geschwindigkeitsniveau innerhalb der Düsen ist nun etwas tiefer, damit die Flächen der beiden Kurven und somit die Gesamtmaschenströme gleich gross ausfallen (Massenbilanz).

Nun wurden noch zwei weitere Extremfälle untersucht, und zwar zwei gegensätzliche Rampen (Case03 und Case04). Diese verdeutlichen in einem Fall sehr hohe Ströme zu Beginn der Düse und sehr wenig Durchströmung am Ende und im anderen Fall gerade die umgekehrte Situation. Die realitätsnahe Verteilung gemäss Abb. 19 gleicht bereits sehr dem Case03. Da aber die Kaltwasserdüse aufgrund eines Strömungsteilers einen speziellen Verlauf aufzeigt («Doppelpeak» innerhalb der Kaltwasserdüse) wurde für den realitätsnahen Fall (mit den CFD-Ergebnissen aus dem Vorprojekt) eine eigene Randbedingung festgelegt (Case05). In jedem dieser Fälle wurde dieselbe transiente Temperaturrandbedingung gemäss Abb. 22 gewählt, welche neben dem oberen und unteren Niveau auch eine mittlere Temperatur im Bereich zwischen den Düsen vorgibt (da es in diesem Bereich keine Durchströmung gibt, sollte diese Annahme zulässig sein).

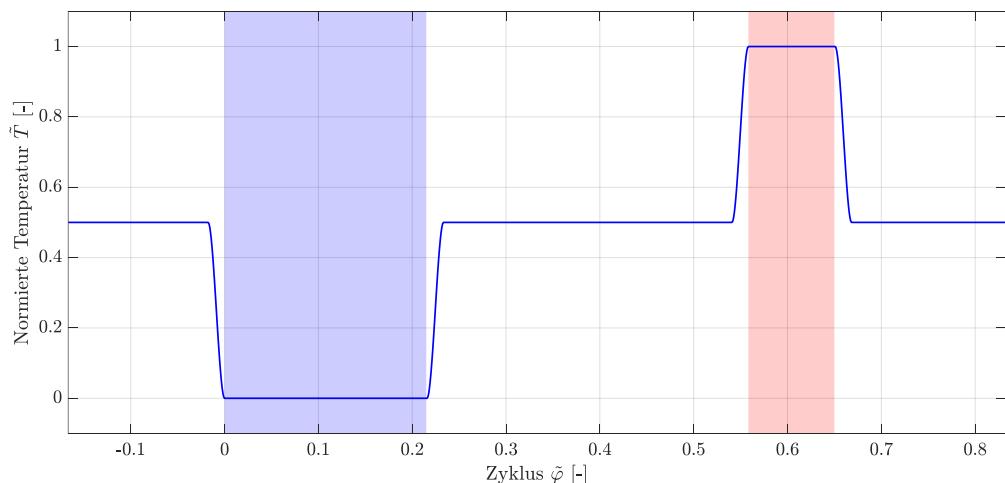


Abb. 22 Temperaturrandbedingung für sämtliche Simulationen



Materialdaten

Für das Material wurde einerseits Chromnickelstahl (CNS) für Vergleiche mit den Messungen, welche vorgängig mit CNS durchgeführt wurden, und andererseits Gd verwendet. Bei CNS wurden konstante Materialdaten verwendet, da sich diese im vorliegenden Temperaturbereich kaum ändern. Bei Gd müssen jedoch temperaturabhängige Daten für die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität vorgegeben werden, denn im Bereich der CURIE-Temperatur ändern sich dessen Materialeigenschaften z. T. markant. Beim Fluid wurden entsprechend die Eigenschaften von Wasser vorgegeben, wobei neben der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität auch die Viskosität temperaturabhängig hinterlegt wurde, da diese zwischen 0 °C und 100 °C relativ stark variiert.

Vernetzung

Um ein optimales Netz zu ermitteln, wurde eine Netzstudie durchgeführt und die Zellengröße im Kanal immer weiter halbiert, bis keine Änderung der Ergebnisse mehr aufgetreten ist. Die Zellenzahl des finalen Netzes beträgt 13'230. Das Rechengebiet wurde gemäss Abb. 23 vernetzt. Der Eintrittsbereich musste viel feiner aufgelöst werden als der Bereich weiter stromabwärts, da aufgrund der Inzidenz und des scharfkantigen Eintritts Ablösezonen und Sekundärströmungen mit erhöhten Geschwindigkeiten auftreten. Da die Strömung laminar ist, muss die wandnahe Zone nicht so fein aufgelöst werden wie im turbulenten Fall, da eine laminare Unterschicht in diesem Sinne nicht existiert. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass das Netz zwischen Material und Fluid übereinstimmt. Man hätte auch eine viel gröbere Vernetzung des Materials verwenden können, aber dann hätte man eventuell Einflüsse von Eintrittseffekten auf das Material «verschmiert», was einem Informationsverlust im Eintrittsbereich gleichkommen würde.

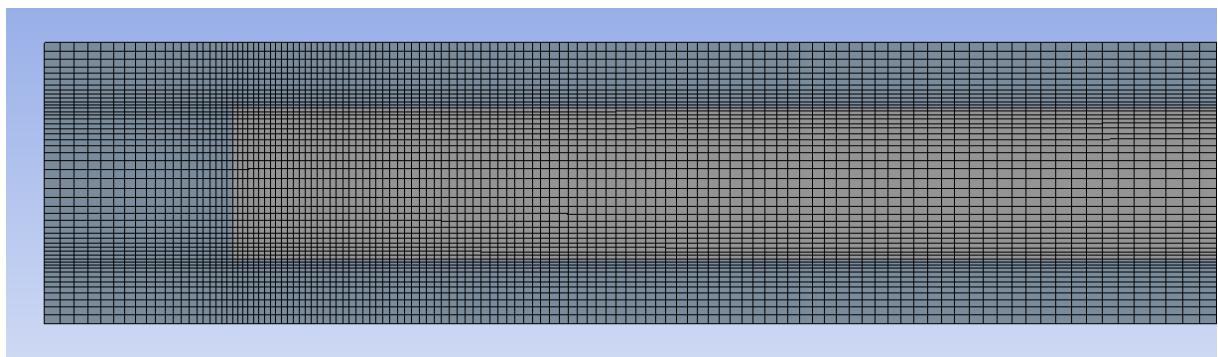


Abb. 23 Vernetzung im Eintrittsbereich (braun: Material, blau: Fluid)

Berechnung

Die Simulationen wurden mit konstanten Startbedingungen durchgeführt. Diese Startbedingungen beeinflussen die ersten Zyklen massgeblich, weshalb so lange weitergerechnet werden musste, bis sich ein quasistationärer Fall eingependelt hat. Dieses Verhalten wird in Abb. 24 dargestellt. Wie man gut erkennen kann, reichen einige, wenige Zyklen aus, bis die Periodizität erreicht ist.

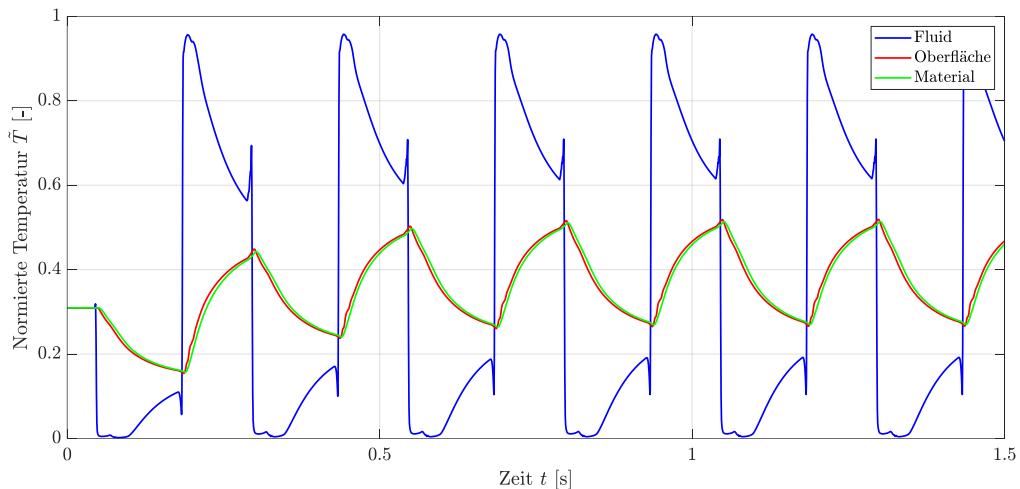


Abb. 24 Einschwingvorgang bzw. Erreichen der Quasistationarität (Temperaturen für die axial-mittige Position, Case05)

Rein optisch (vgl. Abb. 24) könnte man meinen, dass nach ca. drei Zyklen die Quasistationarität erreicht ist. Es sind aber noch Abweichungen vorhanden, welche erst auffallen, wenn man die Differenz der letzten zwei Zyklen berechnet. Diese Werte wurden jeweils überprüft und davon abhängig die Mindestanzahl der Zyklen bestimmt, welche berechnet werden müssen.

Bei den vorhandenen Betriebsbedingungen (Drehzahl, Volumenströme, Temperaturniveaus etc.) reichen i. Allg. sechs Zyklen aus, um nahezu Quasistationarität zu erreichen. Bei sechs Zyklen und einer gewählten Zeitschrittweite von $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ ergibt dies ca. 30'000 Zeitschritte, welche jeweils iterativ berechnet werden müssen. Eine Rechnung auf 50 Prozessorkernen dauert ca. 48 h. So konnten alle zehn Fälle (je fünf Cases für die beiden Materialien CNS und Gd) in einer überschaubaren Zeit durchgeführt werden.

Ergebnisse

Anhand der gewonnenen transienten Daten können nun verschiedene Auswertungen vorgenommen werden. Einerseits können z. B. die Ergebnisgrößen im Eintrittsbereich grafisch dargestellt werden, was zu einem besseren Verständnis der Strömungssituation beiträgt. Die Geschwindigkeits- bzw. Temperaturverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Warmwasserdurchströmung wird hierzu in Abb. 25 bzw. Abb. 26 dargestellt.

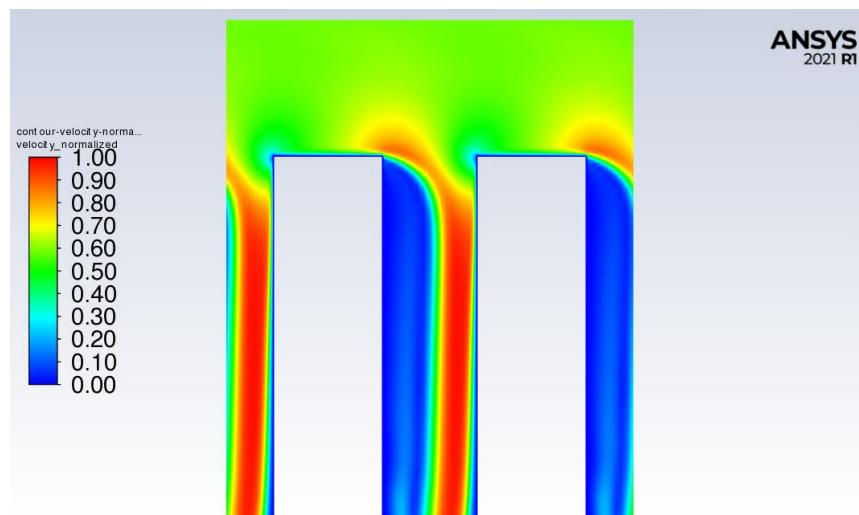




Abb. 25 Geschwindigkeitsverteilung im Eintrittsbereich (beliebiger Zeitpunkt während der Warmwasserdurchströmung)

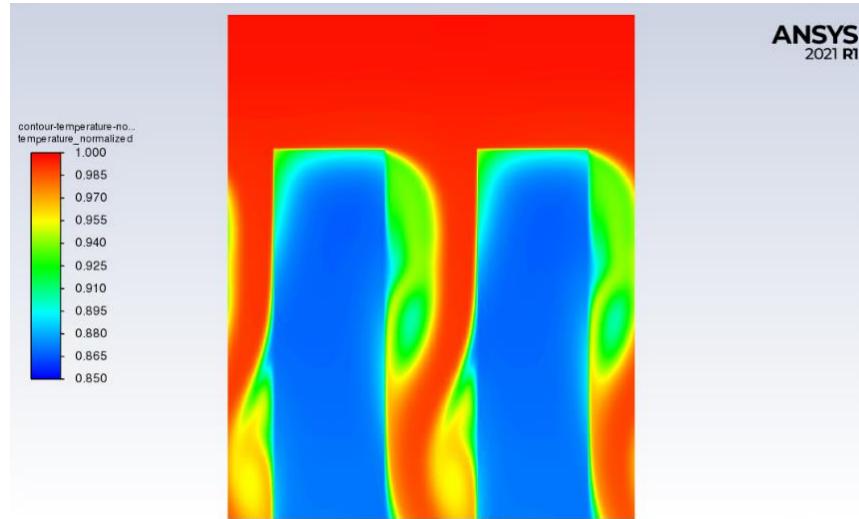
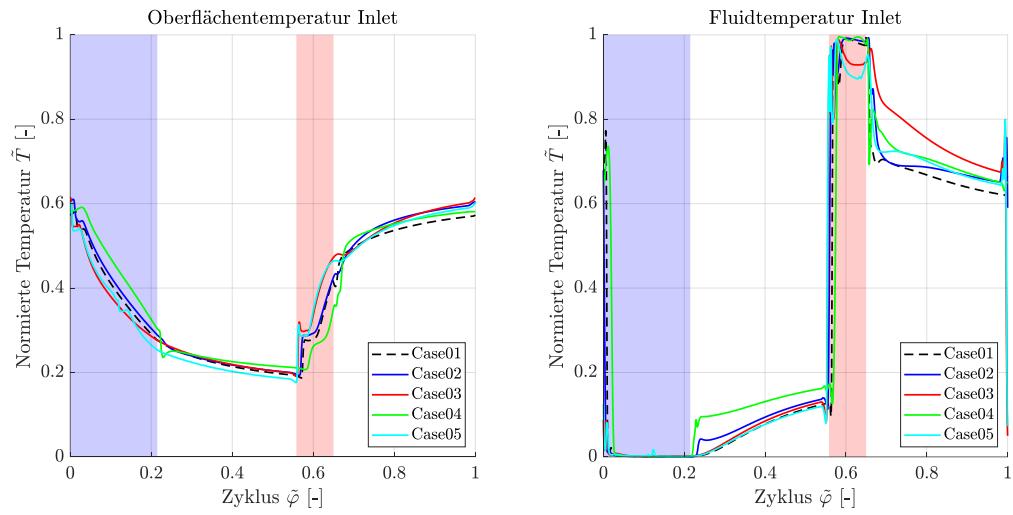


Abb. 26 Temperaturverteilung im Eintrittsbereich (beliebiger Zeitpunkt während der Warmwasserdurchströmung)

Diese beiden Darstellungen eignen sich nur bedingt für die Beurteilung der Gesamtsituation. Um die Zeitabhängigkeit der Temperaturdaten zu verdeutlichen, können nun Punkte im Rechengebiet definiert werden, über welche die zeitabhängigen Daten ausgegeben werden können. Damit eine direkte Vergleichbarkeit möglich ist, wurden dieselben Positionen verwendet, wie sie für die Messungen definiert wurden (vgl. 4.2.3 bzw. Abb. 31). Die Temperaturverläufe für drei Positionen in axialer Richtung (Eintritt, Mitte, Austritt) und für zwei Positionen in tangentialer Richtung (Materialoberfläche, Kanalmitte/Fluidtemperatur) sind zur Übersicht jeweils für alle fünf Cases in Abb. 27 dargestellt.



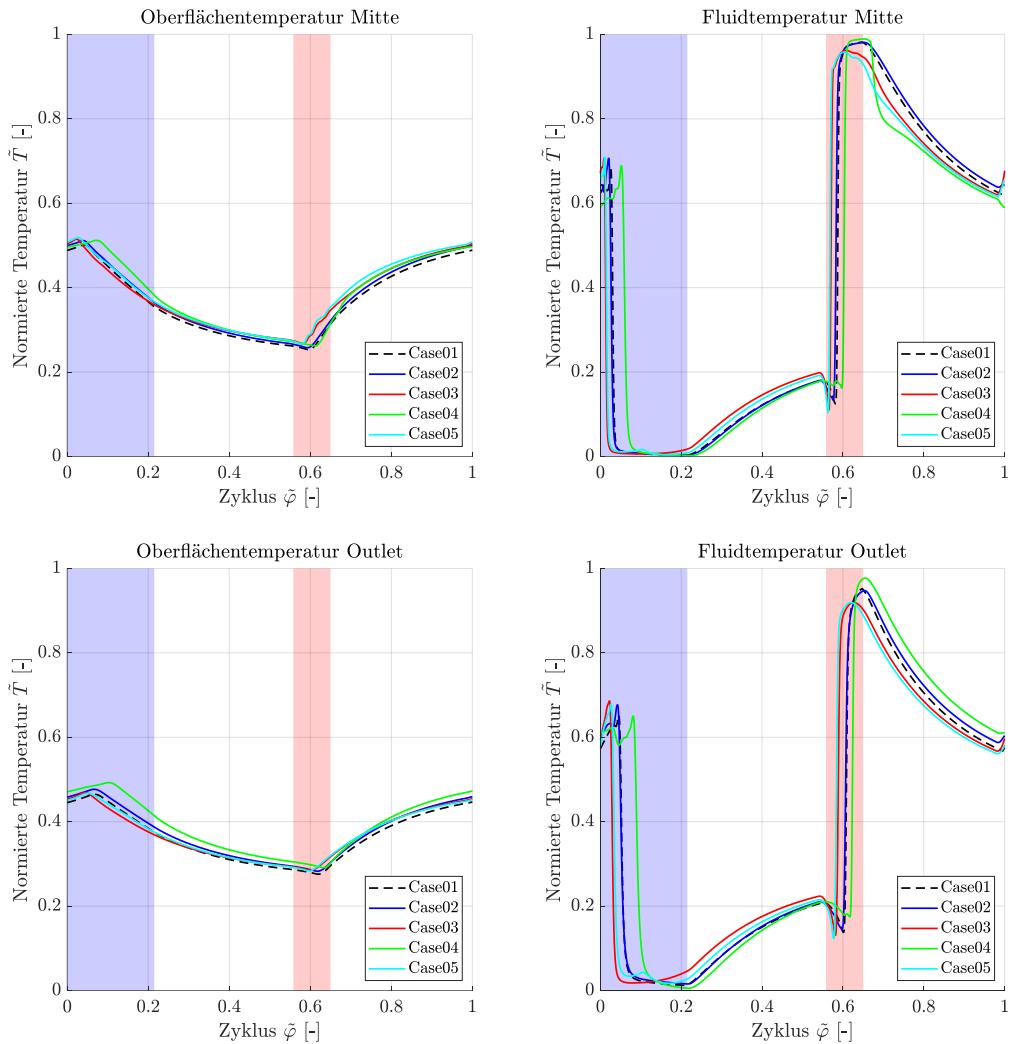


Abb. 27 Temperaturverläufe für alle RB (Case01-05)

Anhand dieser Temperaturverteilungen konnten bereits wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Cases scheinen auf den ersten Blick nicht gross zu sein, doch betrachtet man den Winkelversatz zwischen den Kurven innerhalb der Warmwasserdüse, so lassen sich signifikante Unterschiede erkennen. Dieser Effekt ist am Eintritt wesentlich geringer als am Austritt, da am Austritt die Sensitivität aufgrund des bis dorthin bereits stattgefundenen Wärmeaustausches i. Allg. grösser ist. Vor allem bei der Fluidtemperatur lässt sich dieser Effekt gut erkennen. Dasselbe Verhalten ist auch bei der Oberflächentemperatur vorhanden, aber die Winkelunterschiede kommen viel weniger zur Geltung, da die Temperaturausschläge generell viel kleiner sind.

Unterschiedliche Eintrittsrandbedingungen der Geschwindigkeit bei gleichem Gesamtmassenstrom wirken sich also deutlich auf die transiente Temperaturverteilung aus. Man kann anhand der qualitativen Verläufe aber nicht ohne Weiteres sagen, welcher Case nun den besten Verlauf für den TMM-Prozess aufzeigt. Aus diesem Grund wurde versucht eine Kennzahl zu bilden, welche die Kühl- respektive die Heizleistung sowie idealerweise den Druckverlust berücksichtigt. Hierfür musste erst einmal der transiente Wärmestrom über die Oberflächen des Materials berechnet werden, welcher in Abb. 28 dargestellt ist.

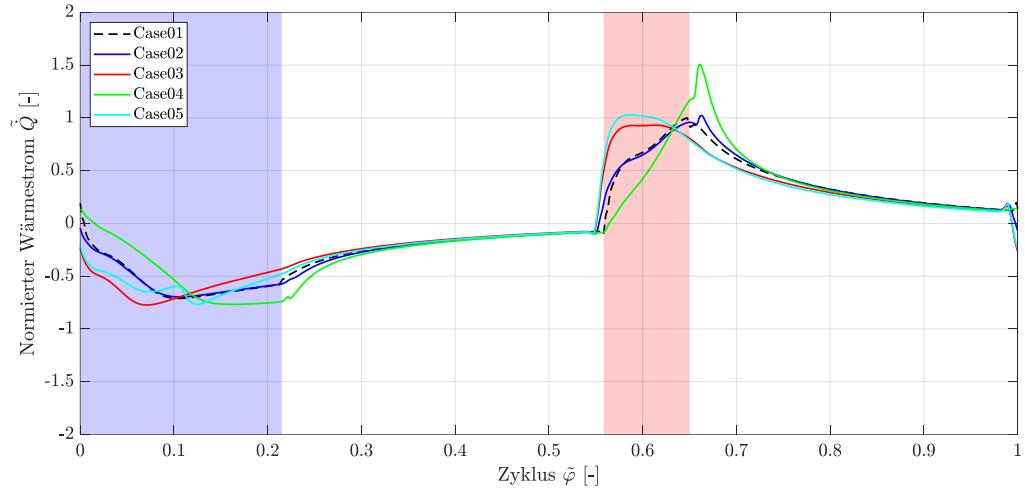


Abb. 28 Transienter Wärmestrom über die Materialoberfläche

Alle Werte unterhalb der Nulllinie bedeuten einen Wärmestrom aus dem Material heraus und alle über null entsprechend einen Wärmestrom ins Material hinein. In dieser Ansicht werden die vorhin identifizierten Unterschiede deutlicher sichtbar. Vor allem im Bereich der Warmwasserdüse haben die einzelnen Kurven einen stark unterschiedlichen Charakter. Dieser widerspiegelt sehr schön die Randbedingungen in Abb. 21. Case01 und -02 entsprechen den beiden blockförmigen Profilen, welche im Wärmestrom ebenfalls einen sehr ähnlichen Verlauf aufzeigen. Case03 und -05 entsprechen dem Profil, welches zuerst viel und am Ende wenig Strömung aufweist. Dies bedeutet auch für den Wärmestrom, dass schon sehr früh hohe Werte erreicht werden und später entsprechend tiefere. Zu guter Letzt gibt es noch Case04, welcher gerade ein entgegengesetztes Profil aufweist und dementsprechend auch im Wärmestrom «nachhinkt».

Auch wenn man nun eine detaillierte Ahnung vom Wärmestromverlauf hat, weiss man dennoch immer noch nicht, welcher Case am besten abschneidet. Aus diesem Grund wurden die einzelnen Verläufe aufintegriert, um die gesamthaft übertragene Wärmemenge pro Zyklus zu erhalten. Das Ergebnis kann in Abb. 29 links in Form eines Balkendiagrammes nachvollzogen werden.

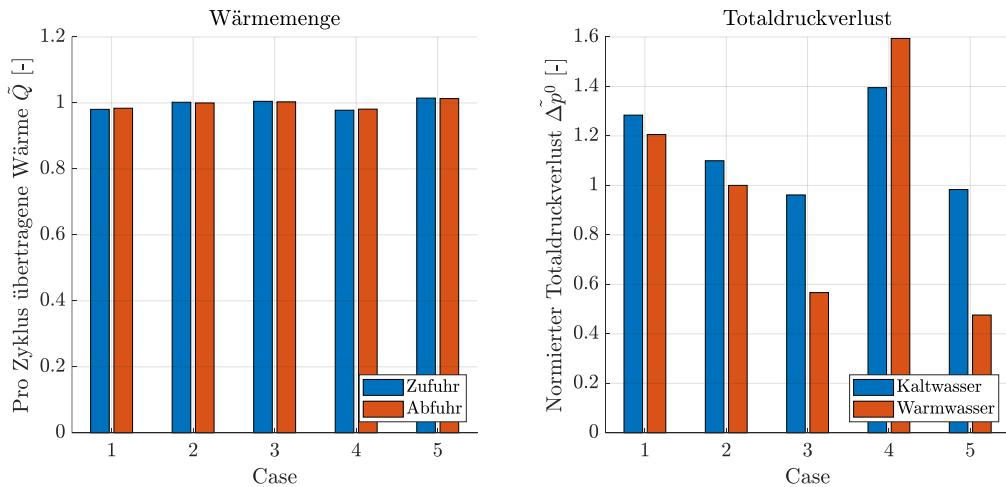


Abb. 29 Gesamtwärmemenge und Totaldruckverlust

Die beiden nebeneinanderstehenden Balken (Wärmezufuhr bzw. -abfuhr in Rot bzw. Blau) sollten jeweils gleich gross sein, wenn quasistationäres Verhalten vorliegt. Dies ist erwartungsgemäss sehr gut erfüllt.



Was nun aber interessant ist, ist die Tatsache, dass die pro Zyklus übertragene Wärmemenge für jeden einzelnen Fall praktisch identisch ist. Dies bedeutet, dass es grundsätzlich keine Rolle spielt, mit welchem Profil eingeströmt wird, denn die gesamthaft übertragene Wärmemenge bleibt gleich. Was aber für den Betrieb des TMM unbedingt auch berücksichtigt werden muss sind die Temperaturverläufe, sowie die Totaldruckverluste und diese ändern sich merklich.

Die Erkenntnis der Winkelversätze der einzelnen Temperaturverläufe wurde bereits vorhin angesprochen. An dieser Stelle sollen noch die Totaldruckverluste analysiert werden. Diese konnten ebenfalls aus den Simulationsdaten extrahiert und dargestellt werden (Abb. 29 rechts). Dabei sind zwischen Warm- und Kaltwasser, sowie auch zwischen den einzelnen Fällen deutliche Unterschiede zu erkennen. Die Warmwasserströmung zeigt tendenziell geringere Druckverluste auf als die Kaltwasserströmung. Dies lässt sich auf die Viskosität und dementsprechend auf tendenziell tiefere Reibungskräfte zurückführen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Fällen sind ein Resultat von nichtlinearen Einflüssen der Geschwindigkeitsrandbedingungen. Der realitätsnahe Fall (Case05) schneidet erfreulicherweise in allen Belangen (Temperaturverlauf, Wärmemenge, Totaldruckverlust) am besten ab.

Vertrauenswürdigkeit der Simulationsdaten

Die bislang gezeigten Resultate müssen immer unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen betrachtet werden. Da die Reynoldszahlen generell tief sind und somit laminar gerechnet werden kann, fällt erfreulicherweise die grosse Unsicherheit der Turbulenz weg, welche normalerweise mit Turbulenzmodellen berücksichtigt wird. Es liegen durch die Vereinfachungen dennoch unter Umständen erhebliche Unsicherheiten vor. Auch wenn realitätsnahe Geschwindigkeitsverteilungen am Eintritt vorgegeben werden, gibt es Abweichungen zur Realität. Dazu kommen weitere Effekte wie z. B. Zweiphasenströmungen (Luft/Wasser-Gemisch), die allenfalls in der realen Maschine vorliegen könnten. All diese komplexen Effekte können hierbei nicht abgebildet werden, was bei einem Vergleich mit Messungen bzw. dem *SimBlue2*-Modell unbedingt berücksichtigt werden muss.

4.2.3 Transiente Temperaturmessungen (Rotor)

Die grosse Herausforderung bei der Modellierung (*SimBlue2*) des Thermo-Magnetischen Motors ist u. a. die korrekte Abbildung der thermischen Vorgänge (Kühlung bzw. Erwärmung) zwischen dem magnetokalorischen Material (Gd) und dem Fluid (Wasser). Hierfür werden primär vereinfachte Korrelationen verwendet, welche i. Allg. einen begrenzten Anwendungsbereich aufweisen. Da die Krafteinwirkung auf den Rotor sehr sensitiv auf veränderte thermische Verhältnisse reagiert, muss die berechnete Temperaturverteilung unbedingt experimentell überprüft werden. Diese Validierung wird anhand von Temperaturmessungen im bewegten Rotor vorgenommen, welche schlussendlich mit den Werten aus der Berechnung verglichen werden können.

Das Konzept der schnellen Temperaturmessung auf dem bewegten Rotor des TMM wurde bereits im Jahr 2019 im Rahmen einer Masterarbeit an der FHNW erarbeitet und umgesetzt. Grundsätzlich geht es darum, selbstgefertigte Thermoelemente an verschiedenen Positionen im Rotor zu platzieren, um so die transiente Temperaturverteilung erfassen zu können. Dabei werden sehr feine Thermo drähte verwendet, um die Ansprechzeiten möglichst kurz zu halten und die Strömung nicht zu beeinflussen. Innerhalb des vorliegenden BFE-Projekts konnte diese Messtechnik verbessert und entscheidend weiterentwickelt werden. So werden die Thermo drähte z. B. nicht mehr auf der Oberfläche, sondern im Material verlegt, sodass die Strömung aufgrund der Messeinrichtung kaum noch beeinflusst wird. Diese Anpassungen führen zu einer erhöhten Genauigkeit der Messwerte.

Die Messungen wurden bisher anstatt auf dem effektiven magnetokalorischen Material (Gd), auf einem Ersatzmaterial aus Chromnickelstahl (CNS) durchgeführt. Der Grund liegt bei der erschwerten Schweißbarkeit von Gd (Thermoelemente werden aufgeschweißt). Weiterhin wurden die Messungen jeweils ohne Magnetfeld (mit «Dummy-Magneten») durchgeführt, da es zu induzierten Spannungen aufgrund der Magnetfelder kommen würde, welche die Messungen negativ beeinflussen würden. Damit eine direkte Vergleichbarkeit gegeben ist, wurden die Modellrechnungen jeweils auch mit CNS durchgeführt (Einfluss der Materialeigenschaften).

SBE ist daran interessiert diese Temperaturmessungen in Zukunft direkt auf Gd und mit den richtigen Magneten durchzuführen. Aus diesem Grund wurde innerhalb dieses Projektes ein erster Versuch gestartet. Es wurde erstmals erreicht Typ K-Thermodrähte auf Gadolinium aufzuschweißen und somit ein komplettes Messsegment aus Gd herzustellen. Gegen Projektende wurde dann mit diesem neuen Gd-Messsegment und dem Gesamtaufbau eine weitere Messkampagne durchgeführt, um die Tauglichkeit dieses neuen Messsegments zu überprüfen. Die Messungen haben grundsätzlich funktioniert, aber wie erwartet werden die Temperatursignale im Bereich der Permanentmagnete so stark beeinflusst, dass eine Verwendung der Rohsignale nicht möglich ist. Mittels weiterer Messungen konnte nachträglich eine Korrektur entwickelt werden, welche den grössten Teil der Störungen weitgehend eliminiert, sodass die Daten für grobe Validierungszwecke verwendet werden können. Die Hauptmessungen für den Modellvergleich wurden jedoch zuvor mit CNS durchgeführt.

Thermoelement-Herstellung und Messaufbau

Vorgefertigte und ummantelte Thermoelemente sind für diese Anwendung deutlich zu gross und zu träge. Deshalb ist der Einsatz kommerzieller Thermoelemente generell ungeeignet. Aus diesem Grund werden die Thermoelemente mit sehr feinen Thermodrähten und ohne Isolierung intern hergestellt. Zur Ermittlung der Oberflächentemperatur werden die Thermodrähte einzeln auf das Material aufgeschweißt (siehe Abb. 30 links). Abb. 30 rechts zeigt zwei verschweißte (gebogene) Thermodrähte, um damit die Fluidtemperatur zu messen. Hierfür wird das Thermoelement zuerst verschweißt und dann in der dafür vorgesehenen elektrisch isolierten Nut platziert. Anschliessend kann die Nut mit Klebstoff ausgefüllt werden, sodass die Strömung praktisch keine Störung erfährt. Es wurde jeweils ein Drahtdurchmesser von 50 µm für die vorliegenden Messstellen gewählt. Mit diesem Vorgehen können Temperaturmessstellen mit Zeitkonstanten im ms-Bereich realisiert werden.

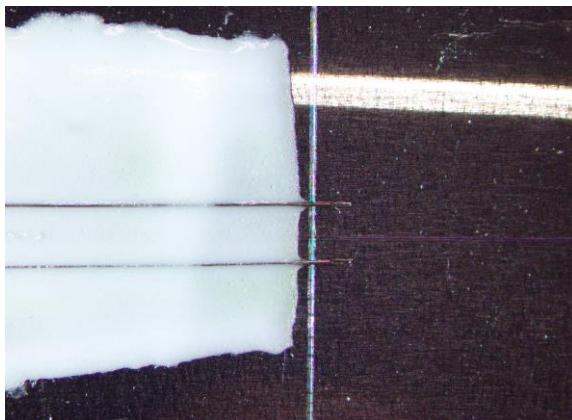


Abb. 30 Thermoelement-Schweissstellen (links: Oberflächenmessung, rechts Fluidmessung)

Genauso aufwändig wie die Schweißpunkte bei der Messstelle ist auch die Anschlussstelle zwischen den feinen Thermodrähten und den Verlängerungsleitungen. Die beiden zu verbindenden Drahtpaare werden in einer speziell gefertigten Vorrichtung befestigt, danach ebenfalls verschweißt und anschliessend mit Klebstoff isoliert. Ein fertiges Messelement ist in Abb. 31 links dargestellt.

In Abb. 31 rechts sind die gewählten Messpositionen auf dem Material dargestellt. Anhand dieser Positionen sind Vergleiche in axialer Richtung (vertikal, vom Eintritt bis zum Austritt) und in radialer Richtung (Innen- bis Außenradius) möglich. Beim Axial-Vergleich sind deutliche Unterschiede zu erwarten, da im Bereich des Eintritts (d. h. oben) Wärme bei grossen Temperaturdifferenzen ausgetauscht wird, während am Austritt (d. h. unten) die Temperaturdifferenzen bereits abgenommen haben. Beim Radial-Vergleich werden unter der Annahme einer gut verteilten Zuströmung keine Unterschiede erwartet. Wie sich dann später zeigt, konnten z. T. aber deutliche Unterschiede identifiziert werden, welche auf eine suboptimale Einströmung der Kaltwasserdüse zurückzuführen sind.



Abb. 31 Messelement (links) und Messpositionen 1-9 (rechts)

Die Messelemente wurden in speziell gefertigten Rotorsegmenten verbaut und für die Messkampagnen am TMM eingesetzt. Die Datenerfassung bzw. -übertragung auf dem drehenden Rotor wurde anhand eines WLAN-Chassis und entsprechendem Messmodul von *National Instruments* (NI) sichergestellt.

Datenauswertung

Anhand der oben vorgestellten Messeinrichtung können die zeitabhängigen Temperaturverläufe im bewegten Rotor erfasst werden. Innerhalb einer Umdrehung durchläuft der Rotor mehrere Zyklen, wobei das Material jeweils aufgewärmt und wieder abgekühlt wird. Damit diese schnellen Temperaturänderungen erfasst werden können, ist eine entsprechend hohe Abtastrate der Thermospannungen notwendig. Die aktuellen Messungen werden mit einer Samplingfrequenz von 50 kHz abgetastet, was für langandauernde Messungen enorme Datenmengen zur Folge hat. Da sich jede Umdrehung leicht von der anderen unterscheidet, ist eine Mittelung über mehrere Umdrehungen sinnvoll, was sich auf die Messdauer und dementsprechend auf die Datenmenge auswirkt. Abb. 32 zeigt eine Messung der Temperatur an einer bestimmten Messposition über ca. 30 Sekunden (ca. 20 Umdrehungen) hinweg. Es lässt sich gut erkennen, dass bei dieser Messung lediglich zwei von gesamthaft sechs Zyklen in Betrieb waren.

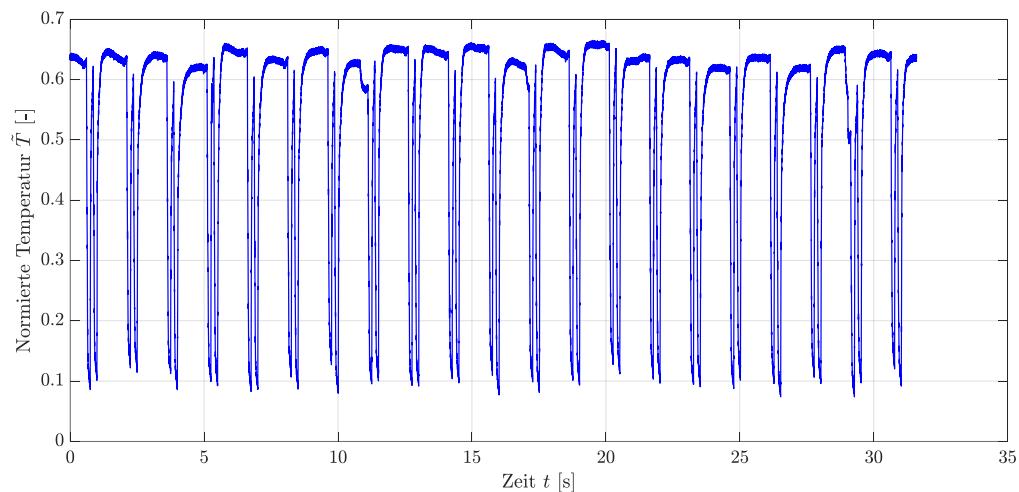


Abb. 32 Rohdaten der Temperaturmessung eines spezifischen Thermoelements (TC #14)

Die Temperaturdaten werden für die weitere Verwendung phasenfest gemittelt, da der Temperaturverlauf über dem Drehwinkel die relevante Validierungsgröße darstellt. Der resultierende gemittelte Temperaturverlauf (blau) sowie die Temperaturverläufe der individuellen Umdrehungen (grau) für diese spezifische Messung kann in Abb. 33 eingesehen werden. In dieser Abbildung sind auch die Düsenpositionen in Blau und Rot dargestellt.

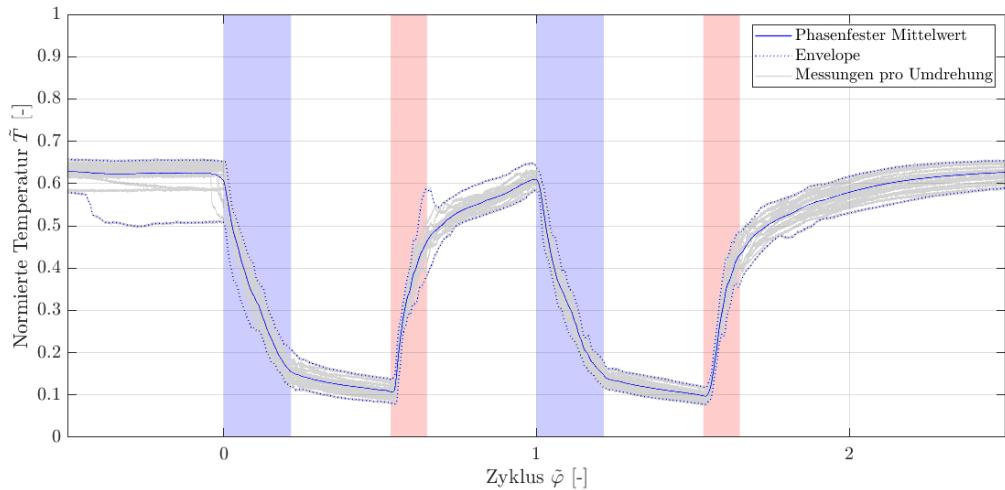


Abb. 33 Gemittelte Temperaturdaten für den Bereich der zwei aktiven Zyklen (TC #14)

Gut zu erkennen sind in Abb. 33 die grossen Gradienten im Bereich der Fluideinflussbereiche. Zwischen den Düsen fallen die Gradienten deutlich geringer aus. Dies ist das Resultat von konvektiver Wärmeübertragung innerhalb des Einflussbereichs der Düsen und der reinen Wärmeleitung bei stehendem Fluid. Für Vergleiche zwischen verschiedenen Messpositionen und/oder Betriebspunkten wurden übersichtshalber nur die gemittelten Temperaturverläufe verwendet. Ein typischer Vergleich zwischen einer Oberflächen- und einer Fluidmessung an derselben Messposition wird in Abb. 34 dargestellt. Um die Daten besser interpretieren zu können, sind zusätzlich die Magnetpositionen und der Flussdichteverlauf dargestellt.

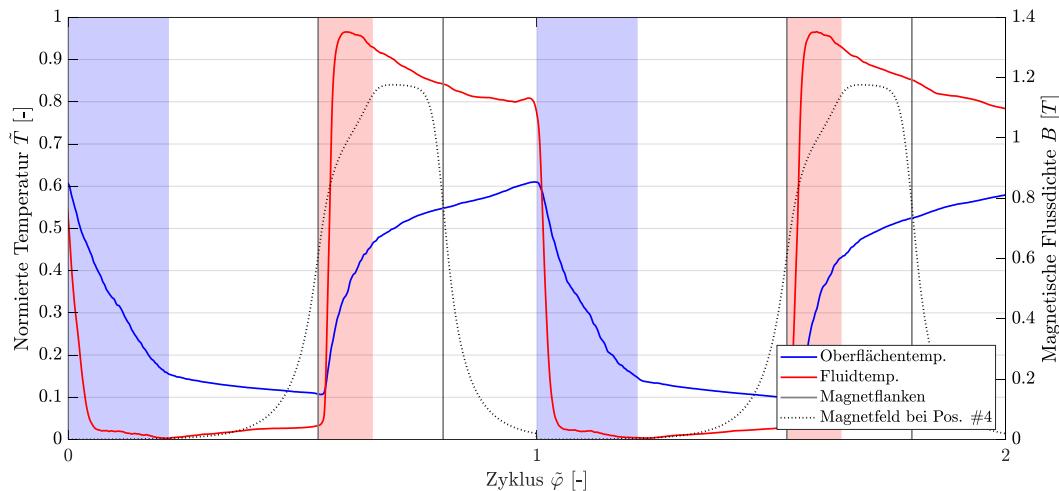


Abb. 34 Transiente Temperaturdaten für die Oberflächen- und Fluidmessung (TC #14 & #20)

Vergleicht man verschiedene Kurven, muss man sich bewusst sein, dass dem Mittelwert eine gewisse Unsicherheit (Streuung) zugrunde liegt. Man kann anhand dieser Abbildung eindrücklich erkennen, dass die Fluidmessung viel weniger träge ist und dementsprechend sehr deutlich auf die Warm- und Kaltwasserströmung reagiert, was dann schliesslich zu grösseren Temperaturdifferenzen führt.

Messergebnisse mit CNS

Zu Beginn soll aufgezeigt werden, dass eine Messung, wie sie in Abb. 34 dargestellt ist, generell sehr gut reproduzierbar ist, und zwar nicht mit demselben Thermoelement, sondern anhand eines redundanten Thermoelements in derselben Messposition, welches aber an einer anderen Winkelposition im Rotor verbaut ist. Es gibt verschiedene Einflussfaktoren, welche einen negativen Einfluss auf die Wiederholbarkeit haben könnten, z. B. leicht unterschiedliche Kanalgeometrien, unterschiedlich geformte Schweißstellen der Thermodrähte, Beeinflussung der Strömung aufgrund der Messstelle, ungenaue Messpositionen und Weitere. Abb. 35 zeigt die Temperaturverläufe zweier redundanten Messstellen. Betrachtet man den Bereich innerhalb der zwei Düsenpaare, so ist die Übereinstimmung der Kurven sehr gut. Am linken und rechten Rand der Grafik sind die Unterschiede etwas grösser, welche aber nicht verglichen werden sollten, da bei diesen Messungen nur ein Teilaufbau (2 Zyklen) aufgebaut war und die Verläufe ausserhalb des Stators nicht repräsentativ sind. Die Daten eines einzigen Thermoelements werden dementsprechend als repräsentativ für die zugehörige Messstelle eingestuft.

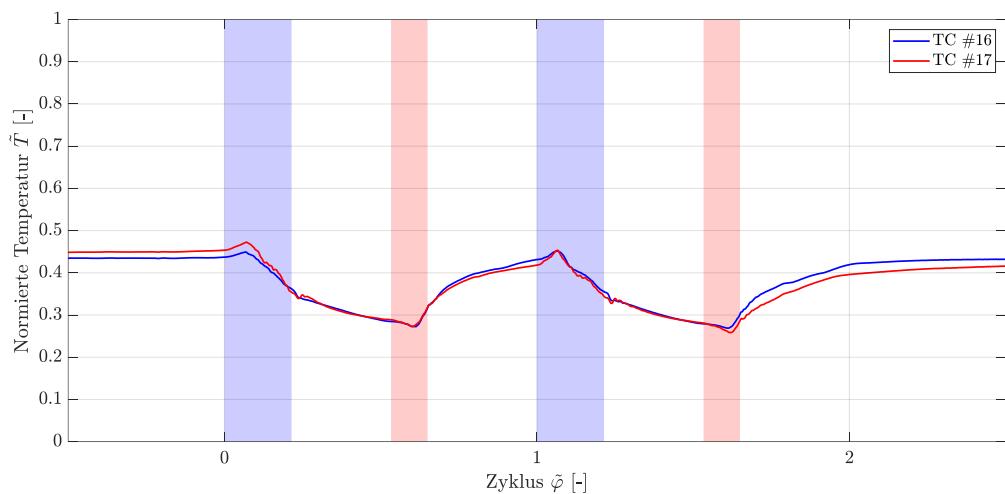


Abb. 35 Temperaturverläufe zweier redundanten Messstellen am Austritt (TC #16 & #17)

Die Messdaten der einzelnen Messpositionen (vgl. Abb. 31 rechts) können nun miteinander verglichen werden. Nachfolgend werden wiederum die Daten über zwei Zyklen hinweg dargestellt, da bei den Temperaturmessungen jeweils nur zwei Zyklen am Umfang in Betrieb waren. Abb. 36 und Abb. 37 zeigen den Axial-Vergleich (radial mittig) einmal für die Oberflächentemperatur und einmal für die Fluidtemperatur.

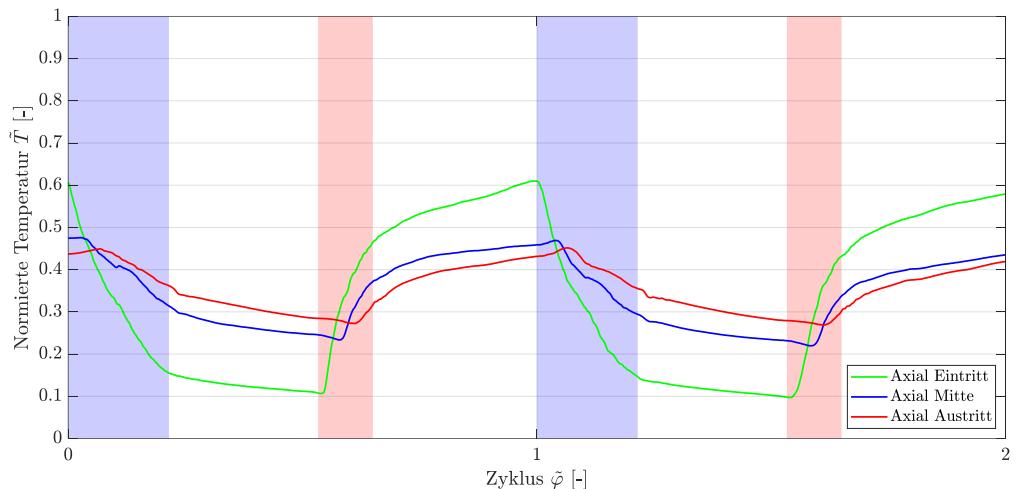


Abb. 36 Axial-Vergleich der Oberflächenmessstellen (radial mittig, TC #14, #15, #16; Position 4, 5, 6)

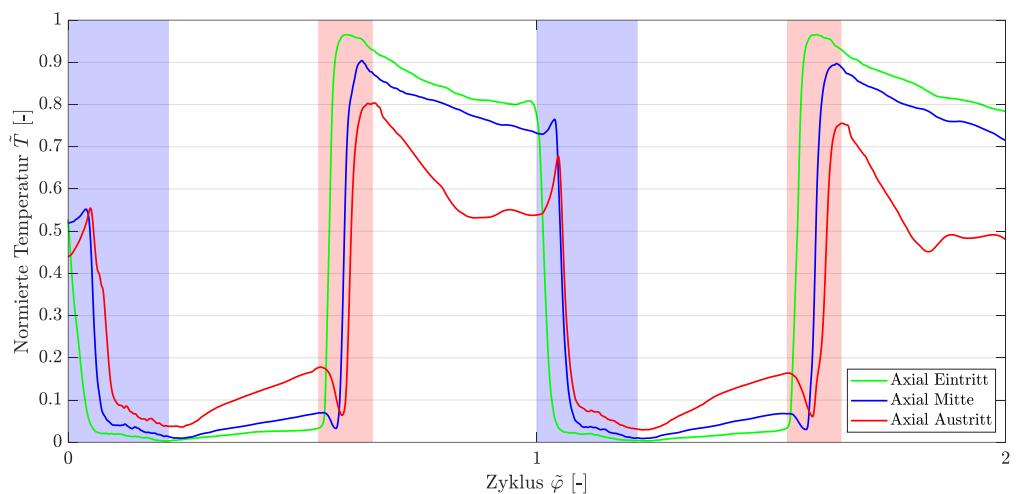


Abb. 37 Axial-Vergleich der Fluidmessstellen (radial mittig; TC #20, #21, #22; Position 4, 5, 6)

Auf den beiden Abbildungen sind mehrere Effekte sehr schön zu erkennen:

- Die Temperaturzunahme und -abnahme zu Beginn der Warm- und Kaltwasserdüsen (linke Flanken) sind um mehrere Grad Phasenwinkel zueinander versetzt (vor allem bei der Fluidtemperaturmessung gut erkennbar). Dies ist eine direkte Folge vom axialen Versatz der Messpositionen, denn die Strömungsfront mit dem neuen Temperaturniveau erreicht die einzelnen Messpositionen mit einer Verzögerung. Auch die Temperaturausschläge sind je nach Position unterschiedlich. Die Eintrittsposition weist die grössten Temperaturausschläge auf, während die Austrittsposition die kleinsten Ausschläge aufweist. Dieses Verhalten erscheint sinnvoll, wenn man bedenkt, dass das Fluid bei der Austrittsposition bereits Wärme mit dem Material weiterstromt aufwärts ausgetauscht hat.
- Andererseits ist vor allem bei der Fluidtemperaturmessung eine Absenkung der Temperatur zu Beginn der Warmwasserdüse und eine Erhöhung zu Beginn der Kaltwasserdüse deutlich erkennbar. Dies ist eine Folge vom im Kanal stehenden Fluid, welches zuerst ausgestossen werden muss, bevor der Kanal mit der neuen Düsenströmung geflutet wird. Wenn man nun die Situation bei der Warmwasserdüse betrachtet, so muss zu Beginn der Düse zuerst das restliche

kalte Wasser ausgestossen werden und deshalb ist eine Temperaturabsenkung zu erkennen. Der Effekt fällt für die Austrittsposition am deutlichsten aus, da Wasser vom Eintrittsbereich ausgestossen wird, welches kälter daherkommt. Der Grund liegt darin, dass im Eintrittsbereich die Kühlung besser ist als am Austritt, da nahezu die gesamte Temperaturdifferenz verwendet werden kann. Am Austritt wurde hingegen viel Wärmeenergie bereits stromaufwärts ausgetauscht und dementsprechend ist auch die Temperaturdifferenz kleiner. Dieser Effekt ist auch bei den Oberflächentemperaturen zu erkennen, jedoch nicht so ausgeprägt wie bei den Fluidtemperaturmessungen.

- Eine weitere interessante Beobachtung ist das Verhalten der Fluidtemperatur innerhalb der Warmwasserdüse. Diese sinkt bereits innerhalb des Wirkungsbereichs der Düse ab. Wenn der Volumenstrom durch die Kanäle innerhalb der Warmwasserdüse konstant wäre, dann dürfte dies eigentlich nicht passieren. Dementsprechend ist dies ein deutliches Indiz dafür, dass der Massenstrom am Düsenende (rechte Düsenflanke) deutlich tiefer ist als zu Beginn. Genau diese Erkenntnis wurde bereits vorgängig mittels CFD-Analysen gewonnen, welche zu Beginn des Abschnittes 4.2.2 erläutert wurde (Abb. 19). Diese Erkenntnis konnte nun anhand von Messungen nochmals bestätigt werden.

Man könnte nun noch die Axialvergleiche am Innen- und Aussenradius analysieren, worauf aber an dieser Stelle verzichtet wird, da keine weiteren interessanten Erkenntnisse resultieren. Was aber noch ausstehend ist, ist ein Radial-Vergleich. Es wurde ein Radial-Vergleich bei den Austrittsmessungen gewählt, da dort die deutlichsten Unterschiede zu erkennen sind. Abb. 38 und Abb. 39 zeigen nun diesen Vergleich auf. Einerseits können hierbei dieselben Effekte identifiziert werden wie bereits beim Axial-Vergleich erläutert wurde. Andererseits sollten sich die Temperaturverläufe zwischen Innenradius, Mitte und Aussenradius nicht mehr unterscheiden, da angenommen wird, dass sich die Eintrittsbedingungen über die radiale Achse nicht ändern. Es zeigt sich nun aber ein deutlicher Unterschied zwischen der Messposition am Aussenradius und der restlichen Positionen, und zwar bei der Oberflächen-, wie auch bei der Fluidmessung. Der Temperaturverlauf der Position am Aussenradius auf der Materialoberfläche ist grundsätzlich um einiges höher als die anderen Verläufe. Bei der Fluidtemperaturmessung (Abb. 39) kann man weiterhin sogar erkennen wo das Problem liegt. Während das obere Temperaturniveau der anderen Verläufe jeweils erreicht wird, kann das tiefe Niveau nicht erreicht werden. Es deutet also einiges darauf hin, dass das Problem bei der Kaltwasserdüse liegt. Aufgrund der Umlenkung unmittelbar vor der Kaltwasserdurchströmung (vgl. Statorvariante in Abb. 14), ist eine negative Auswirkung auf die Durchströmung am Aussenradius durchaus erklärbar. Mit dieser Erkenntnis konnte u. a. ein verbessertes Statordesign für den finalen Aufbau entwickelt werden.

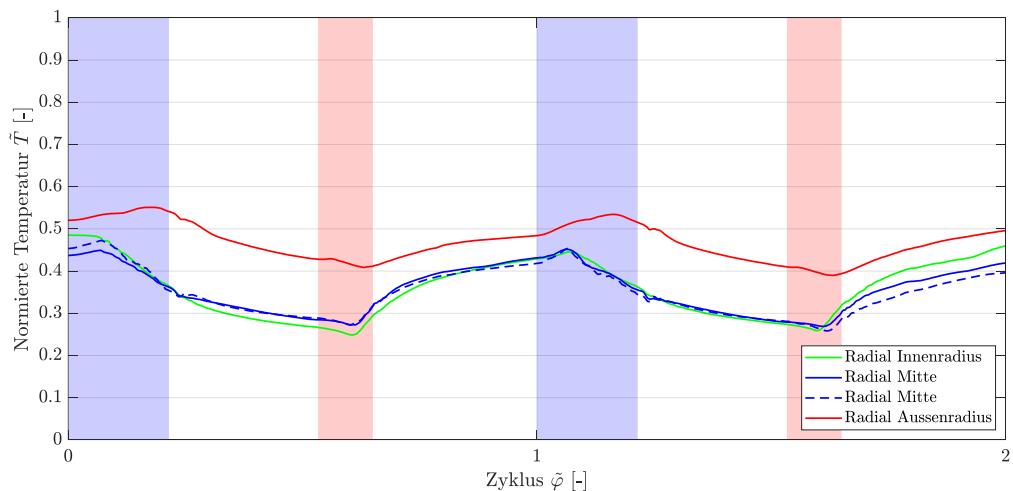


Abb. 38 Radial-Vergleich der Oberflächenmessstellen (axial Austritt; TC #13, #16, #17, #18; Position 3, 6, 6, 9)

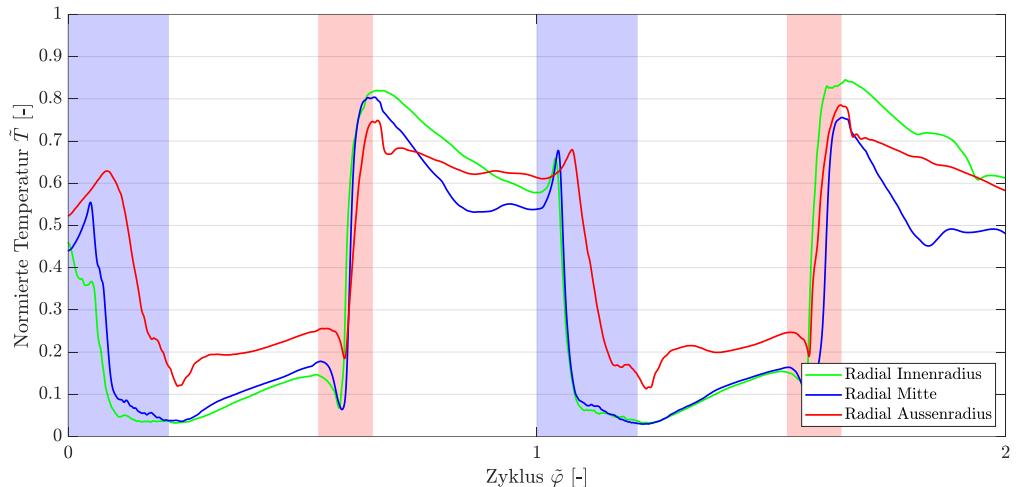


Abb. 39 Radial-Vergleich der Fluidmessstellen (axial Austritt; TC #19, #22, #24; Position 3, 6, 9)

Messergebnisse mit Gadolinium

Im Gegensatz zu den Messungen mit CNS-Messelementen wurden die Messungen mit Gd-Messelementen nicht mit dem «Dummy»-Aufbau, sondern mit richtigen Permanentmagneten durchgeführt. Dies ist besonders vorteilhaft, da damit Messungen im realen Betrieb (Gesamtaufbau) möglich sind. Das Ziel dieser Messkampagne besteht in erster Linie nicht darin, direkt Erkenntnisse zur Temperaturverteilung zu gewinnen, sondern aufzuzeigen, dass die Temperaturmessungen auch mit Gd und vorhandenem Magnetfeld funktionieren.

Die erste Herausforderung ist das Aufschweißen der Thermodrähte auf Gd. Aufgrund der starken Oxidation des Materials wird das Schweißen erschwert. Es ist schliesslich jedoch gelungen, dauerhafte Verbindungen zwischen den Thermodrähten und Gd herzustellen. Die zweite grosse Herausforderung sind Störungen, welche durch das Magnetfeld hervorgerufen werden. Das Bewegen der Thermoelement-Leiterschleife im Magnetfeld bewirkt induzierte Ströme, welche die gemessene Spannung beeinflusst. Somit musste das gemessene Signal korrigiert und die Störungen bestmöglich herausgefiltert werden, um die Temperaturverläufe verwenden zu können. Auch dies konnte bis zu einem bestimmten Grad erreicht werden. Abb. 40 zeigt einen Zyklus einer solchen Gd-Messung für ein Thermoelement, dass sich an Position 3 (vgl. Abb. 31), also ganz am Innenradius befindet. Dementsprechend ragt auch nur ein kleiner Teil der Leiterschleife in das Magnetfeld, was zu deutlich weniger Magnetfeldeinfluss führt als bei den übrigen Messstellen.

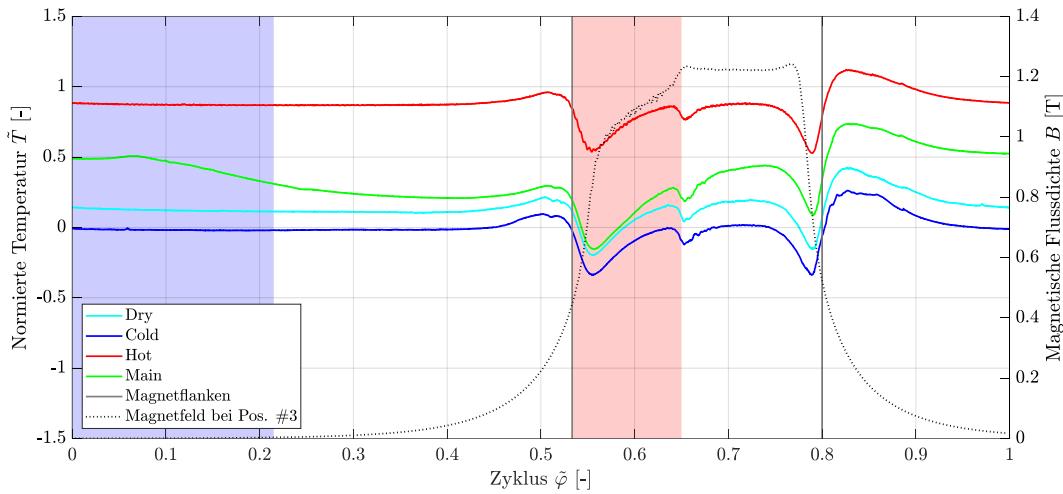


Abb. 40 Ein Zyklus der Gd-Messungen für Position 3 (TC #25; radial innen)

Zum Vergleich sind in Abb. 41 die Verläufe für die Position 9 (vgl. Abb. 31) dargestellt. In diesem Fall liegt die Messstelle am Außenradius des Rotors, d. h. die Leiterschleife überstreicht einen beträchtlichen Teil des Magnetfeldes. Dementsprechend fallen die Störungen entsprechend grösser aus.

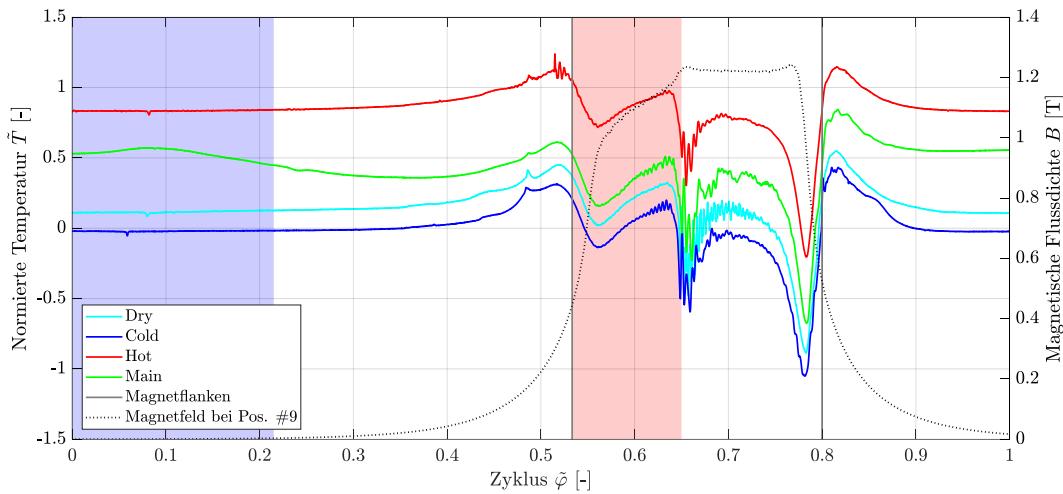


Abb. 41 Ein Zyklus der Gd-Messungen für Position 9 (TC #30; radial aussen)

Dargestellt sind einerseits die Hauptmessung (*Main*) und drei Zusatzmessungen (*Dry*, *Hot*, *Cold*). Die Hauptmessung entspricht dem eigentlichen Betriebspunkt der Maschine und die restlichen Messungen wurden bei konstanter Rotortemperatur (nur Warm- oder Kaltwasser, bzw. eine Trockenmessung bei Umgebungstemperatur) durchgeführt. In allen Verläufen ist der Einfluss des Magnetfeldes deutlich zu erkennen. Mithilfe der Zusatzmessungen wurde versucht, die Störung in der Hauptmessung zu unterdrücken, damit der tatsächliche Temperaturverlauf analysiert werden konnte. Da die drei Zusatzmessungen bei einer nahezu konstanten Temperatur durchgeführt wurden, sind jegliche Signaländerungen auf die Magnetfeldwirkung zurückzuführen, was eine (grobe) Korrektur der Hauptmessung ermöglicht. D. h. es wurde eine einfache Subtraktion zwischen der Hauptmessung und einer der Zusatzmessungen durchgeführt, um den Magnetfeldeinfluss herauszufiltern. Wie sich herausgestellt hat, eignet sich die *Hot*-Zusatzmessung am besten für diese Korrektur. Abb. 42 zeigt nochmals die Hauptmessung und zusätzlich den mit dem *Hot*-Signal korrigierten Verlauf. Wie gut zu erkennen ist, konnte der Magnetfeldeinfluss weitgehend herausgefiltert werden.

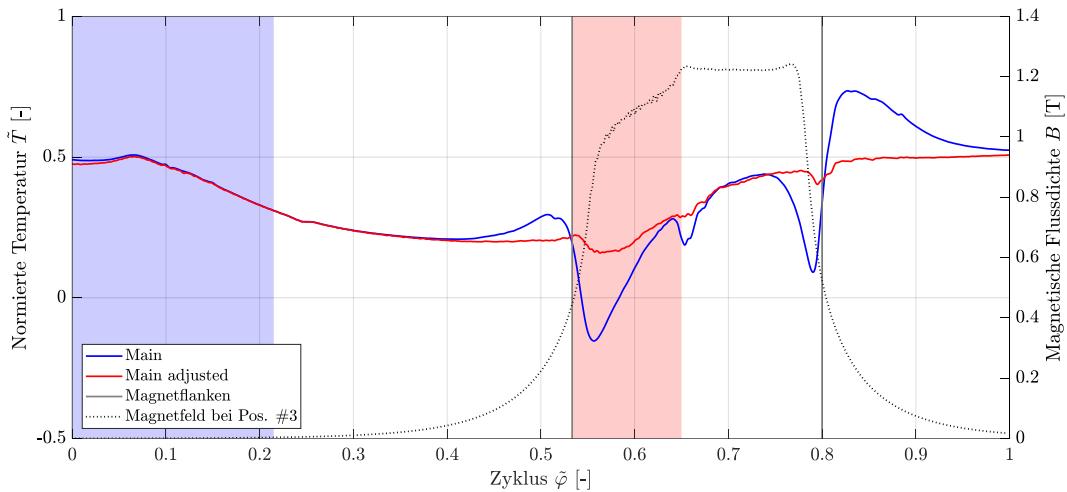


Abb. 42 Korrektur der Gd-Hauptmessung für Position 3 (TC #25)

Abb. 43 zeigt einen Temperaturverlauf für ein Thermoelement an der Position vier, also radial mittig und axial am Eintritt. Dies ist eine interessante Ansicht, weil die Eintrittsposition einer grossen Temperaturdifferenz ausgesetzt ist und die radiale Position weiter ins Magnetfeld hineinragt als es bei der Position drei der Fall ist. Im Vergleich zu Abb. 42 sind entsprechend deutlich mehr Störungen auf dem korrigierten Signal zu erkennen, welche nicht vollständig herausgefiltert werden konnten. Dennoch kann gefolgert werden, dass die gewählte Korrekturmethode prinzipiell gut funktioniert und bei zukünftigen Messungen durchaus zum Einsatz kommen kann.

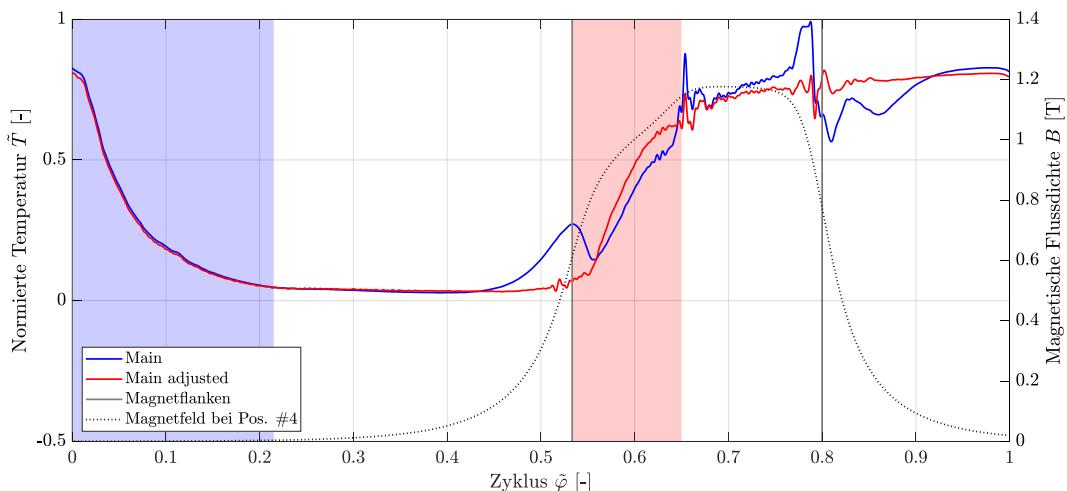


Abb. 43 Korrektur der Gd-Hauptmessung für Position 4 (TC #26)

4.2.4 Validierung

Die aufgenommenen Temperaturmessdaten aus dem vorherigen Abschnitt können mit den in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten CFD-Daten und ebenfalls mit dem Berechnungsmodell *SimBlue2* validiert werden. In den nachfolgenden Abbildungen werden die drei verschiedenen Datenquellen einander gegenübergestellt (die Verläufe der CFD-Simulation (vgl. 4.2.2) bzw. die Messdaten (vgl. 4.2.3) wurden bereits in den vorgängigen Abschnitten behandelt). Durch die Erweiterung der Messtechnik auf Gd (vgl. 4.2.3) können sowohl die CNS- als auch die Gd-Messungen (inkl. Korrektur) validiert werden.

In den nachfolgenden Abbildungen wird die Validierung der CNS-Messungen dargestellt, und zwar jeweils für die Oberflächen-, als auch für die Fluidtemperaturmessungen. Die Temperaturen an den entsprechenden Messpositionen können in den CFD-Daten und im *SimBlue2*-Modell ausgelesen werden. Die drei Abbildungen entsprechen dabei drei verschiedenen axialen Positionen (Abb. 44: Eintritt, Abb. 45: Mitte, Abb. 46: Austritt). Übersichtshalber werden nur die radial-mittigen Positionen über zwei Zyklen dargestellt.

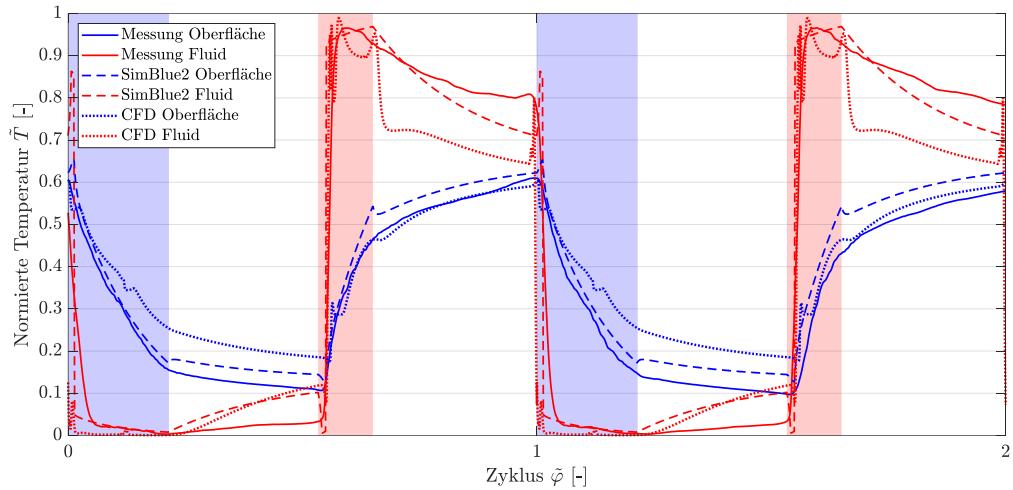


Abb. 44 CNS-Validierung für Position 4 (Radial-Mitte / Axial-Eintritt; TC #14, #20)

An der Eintrittsposition (Abb. 44) sind die Temperaturdifferenzen am grössten, was sich i. Allg. in der raschen Erwärmung/Abkühlung zeigt. Zwischen den CFD-Ergebnissen und den Messdaten fallen deutliche Unterschiede auf, auf der Oberfläche vor allem nach der Kaltwasserdüse und im Fluid nach der Warmwasserdüse. Diese Abweichungen sind auf die Randbedingungen in der CFD-Simulation zurückzuführen, da die hier betrachtete Messposition sehr nahe am Eintritt liegt und somit deutlich von der Eintrittsrandbedingung beeinflusst wird. Abgesehen von dieser Diskrepanz ist die generelle Übereinstimmung sehr gut.

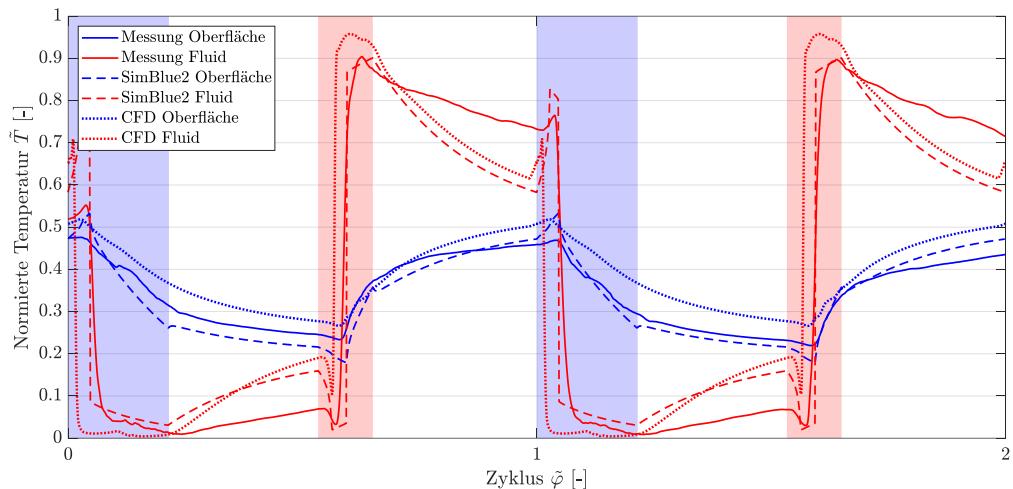


Abb. 45 CNS-Validierung für Position 5 (Radial-Mitte / Axial-Mitte; TC #15, #21)

Axial in der Mitte (Abb. 45) sind die Temperaturdifferenzen bereits kleiner, was eine deutlich langsamere Erwärmung/Abkühlung der Materialoberfläche zur Folge hat (gegenüber dem Eintritt in Abb. 44). Bei

den Fluidtemperaturverläufen stimmen die beiden Simulationen (CFD, *SimBlue2*) sehr gut überein, die Messungen hingegen zeigen vor allem im Bereich zwischen den Düsen ein weniger ausgeprägtes Verhalten. Bei den Oberflächentemperaturverläufen ist es die Messung, welche gut mit dem *SimBlue2*-Modell übereinstimmt. Der CFD-Verlauf liegt tendenziell leicht höher. Ein allgemein sehr wichtiges Validierungsmerkmal ist der Anstiegszeitpunkt bei der Warmwasserdüse. Während am Eintritt (Abb. 44) die Temperaturen nahezu gleichzeitig ansteigen, ergeben sich nun vor allem bei den Fluidtemperaturen leichte Winkeldifferenzen.

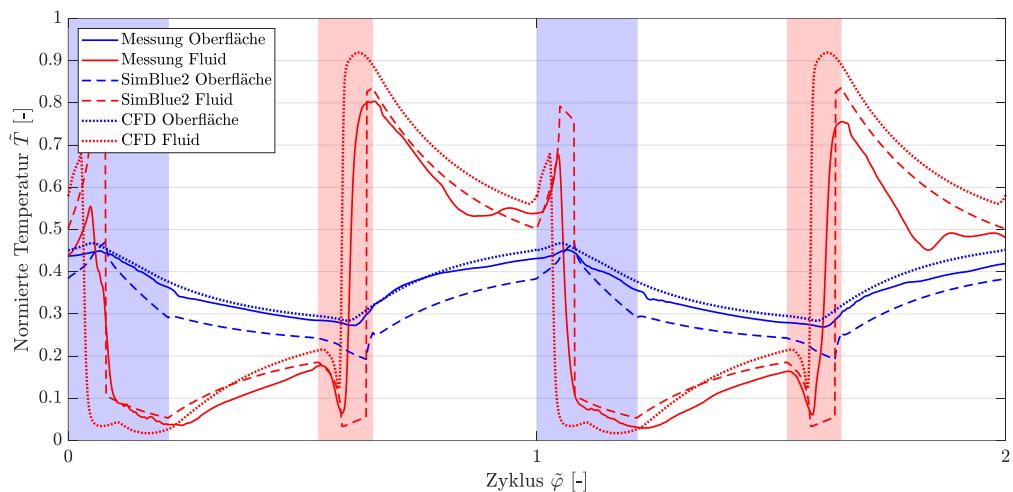


Abb. 46 CNS-Validierung für Position 6 (Radial-Mitte / Axial-Austritt; TC #16, #22)

Am Austritt (Abb. 46) sind die Unterschiede am grössten. Vor allem der starke Winkelversatz zwischen dem *SimBlue2*-Modell und den anderen zwei Datensätzen innerhalb der Durchströmungsphasen (Warm- bzw. Kaltwasserdüse) fällt auf. Der Temperaturanstieg bzw. -abfall scheint im *SimBlue2*-Modell vergleichsweise spät zu erfolgen. Messungen und CFD-Daten stimmen generell sehr gut überein, speziell die Oberflächentemperaturen. Die *SimBlue2*-Ergebnisse scheinen dagegen etwas zu tief auszufallen.

Im Anschluss an die Analyse der Daten erfolgte die gesamtheitliche Interpretation in Bezug auf potenzielle Verbesserungen des *SimBlue2*-Modells im Bereich der Wärmeübertragung bzw. der Durchströmung. Darauf soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Validierung grundsätzlich keine grossen Abweichungen bzw. Auffälligkeiten aufgezeigt hat, das *SimBlue2*-Modell damit jedoch an entscheidenden Stellen gezielt verbessert werden konnte. Die Anwendbarkeit des *SimBlue2*-Modells als Auslegungstool konnte somit mit den Messdaten, wie auch mit den CFD-Simulationen bestätigt werden. Gleichzeitig bedeutet dies, dass das grundlegende Verständnis des TMM-Prozesses sehr fortgeschritten ist.

4.3 Materialforschung (TU Delft)

Die Zukunft der TMM-Technologie wird primär durch Fortschritte in der Materialentwicklung getrieben, darum war für SBE die Zusammenarbeit mit entsprechenden Partnern auf dem Gebiet der Materialforschung von Beginn an essenziell. SBE ist in mehrere internationale Forschungsprojekte involviert, welche die Entwicklung neuartiger magnetokalorischer Materialien zum Ziel haben. Die Zusammenarbeit betrifft insbesondere die TU Delft, welche weltweit führend ist im Bereich der magnetokalorischen Materialforschung. Hervorzuheben an dieser Stelle ist auch das aus der TU Delft entstandene Spin-Off *Magneto B. V.*, welches versucht die Brücke zwischen der Grundlagenforschung und der industriellen Entwicklung bzw. Herstellung dieser Materialien zu schlagen. An dieser Stelle sollen kurz die Vorteile der neuartigen magnetokalorischen Materialien gegenüber Gd aufgeführt werden.

- Der magnetokalorische Effekt (MCE) ist deutlich ausgeprägter, was generell zu einer höheren Effizienz führt (vgl. Abb. 47).
- Der MCE ist bereits bei geringen magn. Flussdichten ausgeprägt, was den Betrieb mit schwächeren und somit günstigeren Permanentmagneten ermöglicht.
- Die CURIE-Temperatur kann via Materialkomposition eingestellt werden und somit kann das Material bzw. der Wärmetauscher optimal auf den vorliegenden Temperaturbereich (Abwärme – Kühlwasser) abgestimmt werden.
- Der magnetische Phasenübergang vollzieht sich in einem kleinen Temperaturbereich um die CURIE-Temperatur (Magnetisierungsverlauf weist einen steilen Gradienten auf im Vergleich zu Gd), d. h. die Kaskadierung von mehreren Wärmetauschersegmenten mit unterschiedlicher CURIE-Temperatur bietet sich an.
- Die Materialien werden voraussichtlich deutlich günstiger sein und vermutlich ohne Elemente der *Seltenen Erden* auskommen sowie bzgl. Umweltverträglichkeit unproblematisch sein.

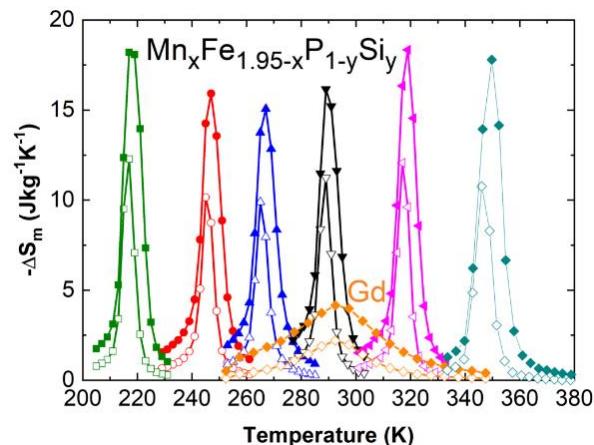


Abb. 47 MCE von $\text{Mn}_x\text{Fe}_{1.95-x}\text{P}_{1-y}\text{Si}_y$ für verschiedene CURIE-Temperaturen im Vergleich zu Gd [Quelle: <https://magneto.systems/>]

Die Materialien, welche aktuell bereits verfügbar oder auf dem Weg zur industriellen Herstellung sind, weisen die oben genannten Vorteile bereits in erheblichem Umfang auf, haben jedoch teilweise (noch) entscheidende Nachteile, die ebenfalls kurz aufgelistet werden sollen.

- Die thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) sind i. Allg. schlecht in Bezug auf die transiente Erwärmung bzw. Kühlung.
- Die Festigkeit dieser Materialien ist deutlich geringer als diejenige von Gd, was zu grossen Problemen in Bezug auf die Dauerfestigkeit (zyklische mechanische und thermische Belastung) führt.



- Der magnetische Phasenübergang ist i. Allg. mit einer Hysterese verbunden, was den effizienten Betrieb dieser Materialien erschwert.
- Der Herstellungsprozess ist äusserst komplex und noch weit entfernt von der industriellen Massenproduktion mit gleichbleibender Qualität und entsprechenden Formgebungsmöglichkeiten (Wärmetauscherstrukturen).

Das laufende und für den vorliegenden Bericht relevante Materialforschungsprojekt an der TU Delft hat den Titel «*Energy Conversion with Highly responsive Magnetic Materials for Efficiency*» und erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. vier Jahren (2019-2023). Das Projekt wird vom *Dutch Research Council NWO* (<https://www.nwo.nl/en>) gefördert und SBE fungiert darin neben *RSP Technology* (<https://www.rsp-technology.com/>) als Industriepartner. Die Tätigkeiten sind in mehrere PhD-Arbeiten gegliedert und sollen hier kurz vorgestellt werden, wobei primär die Zielsetzung und der aktuelle Stand von Interesse sind. Zu erwähnen ist, dass in diesem Projekt auch Materialien für die magnetokalorische Kühlung und für magnetokalorische Wärmepumpen gesucht bzw. erforscht werden, welche grundsätzlich auch für TMM-Anwendungen (Abwärmenutzung) potenziell interessant sind.

4.3.1 AP: *New magnetocaloric materials for heat pumps operating in low magnetic fields*

In diesem Arbeitspaket geht es speziell um Materialien, welche sich für die magnetokalorische Kühlung bzw. Heizung (Wärmepumpe) eignen (Umkehrprozess zu TMM-Prozess). Ausgehend von der Basiskomposition $(\text{Mn},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{P})$ werden verschiedene Parametervariationen durchgeführt, wobei besonders die Beeinflussung der CURIE-Temperatur und der Hysterese im Zentrum stehen. Das Feld der magnetokalorischen Kühlung ist für SBE etwas weniger relevant, doch auch in diesem Feld sind etliche Forschungsgruppen bzw. Startups o. ä. aktiv. Da die Unterschiede in Bezug auf die Materialanforderungen gering sind, sind Fortschritte im Bereich der magnetokalorischen Kühlung auch für SBE äusserst wertvoll.

Insbesondere durch das Mn/Fe-Verhältnis können die relevanten Parameter (CURIE-Temperatur, Hysterese) systematisch beeinflusst werden. Der Herstellungsprozess und besonders die Wärmebehandlung der zu untersuchenden Samples hat ebenfalls einen grossen Einfluss auf den Phasenübergang bzw. die Hysterese.

In einem weiteren Schritt wurde Mangan (Mn) durch Nickel (Ni) und Cobalt (Co) ersetzt und wiederum vor allem der Einfluss auf die CURIE-Temperatur und die Hysterese untersucht. Bei diesen Kompositen wurde zudem das P/Si-Verhältnis variiert, welches neben den genannten Parametern besonders die mechanische Stabilität beeinflusst, was äusserst relevant ist in Bezug auf die gegenüber Gd geringere Festigkeit/Zähigkeit der neuartigen magnetokalorischen Materialien (vgl. 4.3).

4.3.2 AP: *New materials suited for waste heat recovery*

In diesem Arbeitspaket wurde der Basiskomplex $(\text{Mn},\text{Cr})_2(\text{Sb},\text{Mn},\text{B})$ untersucht. Darauf basierende Kompositionen (z. B. $\text{Mn}_2\text{Sb}_{1-x}\text{Bi}_x$ oder $\text{Mn}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Sb}$) werden als vielversprechende Kandidaten für magnetokalorische Anwendungen, speziell im Bereich der Abwärmenutzung (TMM), angesehen. Die CURIE-Temperatur lässt sich wiederum durch das Mischverhältnis einzelner Komponenten beeinflussen, doch leider liegt der mögliche Temperaturbereich (noch) nicht ideal für die Abwärmenutzung. Neben der oben genannten Basiskomposition wurden weitere vielversprechende Kompositionen untersucht, u. a. die Laves-Phasen $\text{Fe}_2(\text{Hf},\text{Ti})$ und $(\text{Fe},\text{Co},\text{Mn})_2\text{Zr}$, wobei das abschliessende Fazit dazu noch ausstehend ist.

In weiteren Arbeiten wurde die Beimischung von Chrom (Cr) oder Vanadium (V) zur Basiskomposition Mn_5SiB_2 zur Beeinflussung der CURIE-Temperatur und der Magnetisierungsänderung untersucht. Daraus resultierten ebenfalls vielversprechende Ansätze für weiterführende Untersuchungen. Für weiterführende Informationen seien auch die bisher abgeschlossenen PhD-Dissertationen an der TU Delft erwähnt, z. B. (You, 2020).

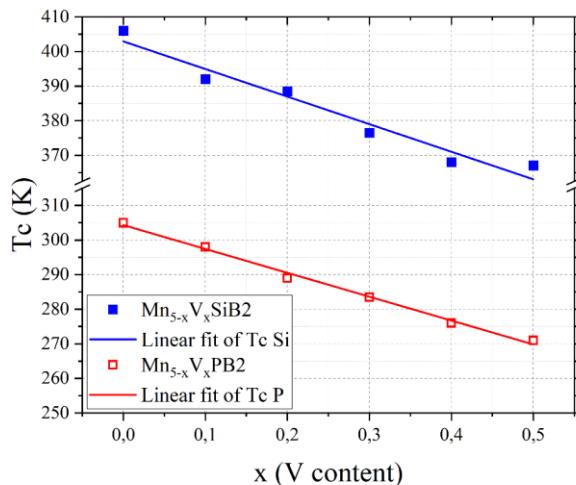


Abb. 48 Curie-Temperatur in Abhängigkeit des Cr-Anteils in $Mn_{5-x}V_xSiB_2$ bzw. $Mn_{5-x}V_xPB_2$
 [Quelle: TU Delft / A. Kienca]

4.3.3 AP: *New computational studies to support the experimental studies*

In diesem Teil des Projektes geht es um die automatisierte, rechnergestützte Suche nach Materialkompositionen, welche sich für magnetokalorische Anwendungen eignen könnten. Dabei werden anhand von existierenden Materialdatenbanken und Algorithmen basierend auf der Dichtefunktionaltheorie (DFT) mögliche Materialkompositionen auf ihr Potential bzgl. des MCE analysiert, wobei diverse Selektionskriterien definiert wurden. Das Ziel besteht darin, aus der riesigen Anzahl an Materialkombinationen (Größenordnung 10^6) potenziell vielversprechende Kompositionen identifizieren zu können und die aussichtsreichsten davon im Labor effektiv herstellen und charakterisieren zu können. Für das Screening ist eine grosse Rechenleistung nötig, da die Anzahl der Materialkombinationen sowie die Komplexität der Berechnungen i. Allg. hoch ist.

Gemäss aktuellem Stand wurde bereits ca. 850'000 Materialkompositionen analysiert und dabei 315 aussichtsreiche Kandidaten identifiziert. Eine grosse Schwierigkeit besteht darin, dass nicht für sämtliche Materialkomponenten in den Datenbanken alle relevanten Größen vorliegen und daher die Modellberechnungen für diese Materialien schwierig bis unmöglich werden. Ebenfalls sind auch die eingesetzten Berechnungsmodelle für einige wichtige Größen selbst sehr unsicher und müssen weiterentwickelt bzw. verbessert werden (z. B. Berechnung der CURIE-Temperatur und der Hysterese etc.). Dies wurde in den letzten Monaten einerseits durch die Ergänzung von weiteren Berechnungsalgorithmen und andererseits durch experimentelle Validierungsmessungen erheblich verbessert, so dass nun präzisere Voraussagen der relevanten Größen in Bezug auf die magnetische Phasenänderung möglich sind. Der Schritt von der modellbasierten Identifikation einer vielversprechenden Komposition hin zur effektiven Herstellung im Labor ist ebenfalls sehr aufwändig und mit grossen Unsicherheiten behaftet. Für erste potenziell vielversprechende Materialkompositionen konnte dieser Schritt bereits erfolgreich vollzogen werden. Für weiterführende Informationen sei auf die Publikationen der TU Delft verwiesen, z. B. (Batashev, Wijs, & Brück, 2021).

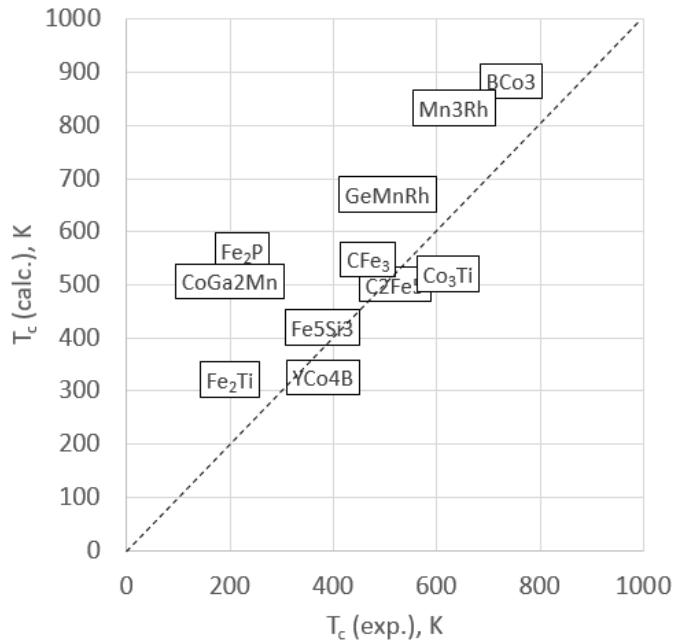


Abb. 49 Vergleich der experimentellen (exp.) und berechneten (calc.) Transitionstemperatur (CURIE-Temperatur) für Referenzmaterialien
[Quelle: TU Delft / I. Batashev]

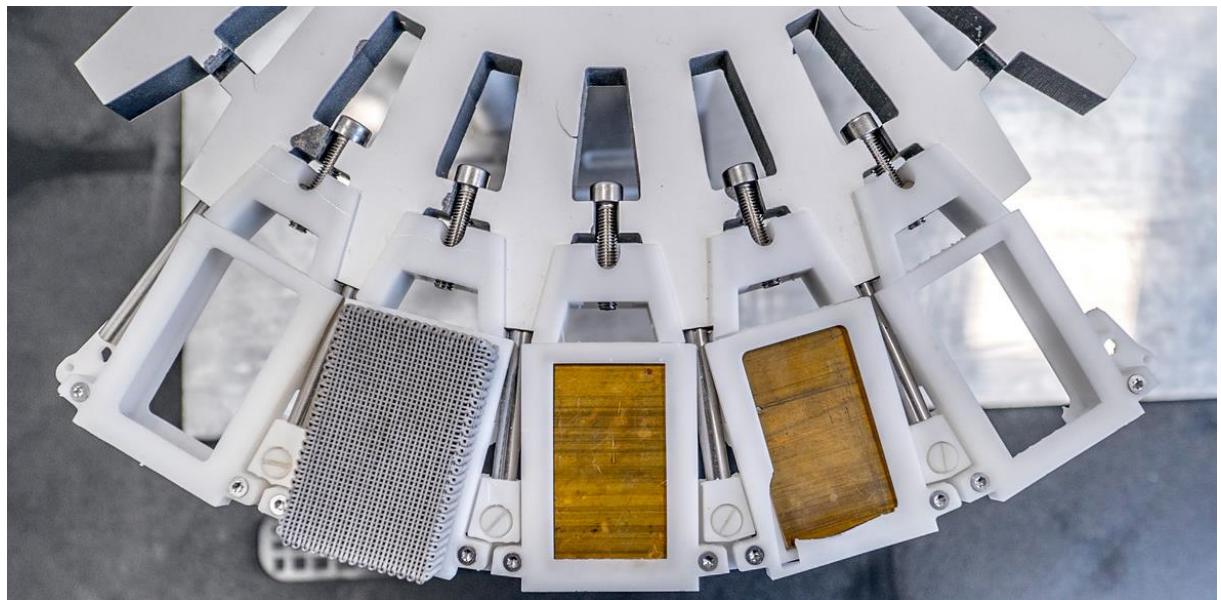


Abb. 50 Mittels 3D-Druck hergestellte magnetokalorische Wärmetauscherstruktur der Firma *Magneto B. V.*
[Quelle: <https://www.ad.nl/den-haag/souvenirtje-voor-op-de-koelkast-met-deze-magneten-wordt-je-koeling-een-stuk-milieuvriendelijker~a9a7b294/>]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Schwerpunkte in der Materialforschung vor allem auf der gezielt einstellbaren CURIE-Temperatur und der Verringerung der Hysterese liegen, wobei der Einfluss verschiedener Materialkompositionen bzw. Mischverhältnisse detailliert untersucht wird. Noch nicht (oder nur untergeordnet) im Fokus stehen die thermischen bzw. mechanischen Eigenschaften. Punkt der industrieller Herstellung von magnetokalorischen Materialien konnte das erwähnte Spin-Off *Magneto B. V.* unter anderem mit additiven Herstellungsverfahren erhebliche Fortschritte erzielen, was



in Bezug auf zukünftige, komplexe Wärmetauschergeometrien einen sehr positiven Ausblick zulässt. Nichtsdestotrotz ist die Materialentwicklung generell äusserst anspruchsvoll und mit erheblichen Risiken verbunden. SBE geht davon aus, dass es i. Allg. mehrere Jahre dauert, bis ein im Labor untersuchtes Material in genügend grosser Menge industriell hergestellt werden kann.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

Mit dem TMM K2 hat SBE eine Demonstrationsanlage mit einer gesicherten Nettoleistung im kW-Bereich gebaut, welche weltweit einzigartig ist. Die TMM-Technologie hat dadurch erheblich an Attraktivität gewonnen und einen weiteren Schritt in Richtung einer ernstzunehmenden und marktfähigen Technologie genommen. Zusammenfassend können einige Punkte hervorgehoben werden:

- Signifikante elektrische Nettoleistung erzielt (elektrische Nettoleistung ≈ 530 W, BWR ≈ 0.1)
- Axiales Strömungskonzept mit geschlossenem Stator umgesetzt
- Gute Übereinstimmung zwischen Auslegungstool und effektiven Messungen erreicht
- Fluidtrennung realisiert und Potential für Kaskadierung aufgezeigt
- Druckverluste gegenüber früheren Anlagen deutlich reduziert

Obwohl das angestrebte Ziel von 1 kW nicht vollständig erreicht wurde, konnte das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden. Das Nichteinreichen der geplanten Nettoleistung ist u. a. auf einige nicht berücksichtigte Verluste und eine zu optimistische Annahme in Bezug auf die am Prozess beteiligte Materialmenge (Gd) zurückzuführen. Durch die laufende Validierung des Berechnungsmodells und die dadurch immer besser werdende Abbildung des realen Prozesses konnte letztendlich eine gute Übereinstimmung mit der Messung erreicht werden. Da die Weiterentwicklung des Berechnungsmodells parallel zum Prüfstandsaufbau erfolgte, konnten nicht mehr alle Erkenntnisse aus der Modellierung in die abschliessende Umsetzung einfließen, wodurch der Auslegungswert für die Nettoleistung schliesslich unter den ursprünglichen Zielwert (1 kW) sank. Neben den oben aufgeführten Zielen konnte das interne Knowhow bei SBE deutlich ausgebaut und das interne Auslegungstool stark weiterentwickelt bzw. verbessert werden, was für zukünftige Entwicklungen einen erheblichen Gewinn bedeutet.

Parallel zu den Arbeiten bei SBE liegen und laufen diverse Tätigkeiten im Bereich der Erforschung/Herstellung neuartiger magnetokalorischer Materialien. Bis zum Abschluss (ca. 2023) des laufenden Materialentwicklungsprojektes an der TU Delft ist mit weiteren vielversprechenden Materialkandidaten für den zukünftigen Ersatz von Gd zu rechnen. Allerdings sind aus Sicht von SBE nach wie vor erhebliche Entwicklungsschritte nötig, um ein aus Effizienz- und Kostengründen vielversprechendes Material mit den gewünschten Eigenschaften herstellen zu können.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Mit dem durch den TMM K2 erbrachten Nachweis einer signifikanten Nettoleistung ist für SBE ein entscheidender Meilenstein erreicht worden, da die TMM-Technologie damit auf ein neues Level gehoben wurde. Gleichzeitig zeigten sich allerdings auch die Limitierungen des aktuell verwendeten Materials (Gd) deutlich, d. h. weitere signifikante Leistungssteigerungen auf Basis des aktuellen Konzeptes sind weitestgehend ausgeschlossen. Aus mehreren Gründen (Effizienz, Preis, Umweltverträglichkeit) ist ein wirtschaftlicher Betrieb des TMM mit Gd nicht möglich. Daher wird der Fokus zukünftiger Entwicklungsschritte auf dem Einsatz von alternativen magnetokalorischen Materialien liegen und insbesondere auf den Voraussetzungen, welche den effizienten Betrieb dieser Materialien ermöglichen. Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften im Vergleich zu Gd, sind neue Konzepte und Prozessanpassungen nötig, um die Gesamteffizienz und die Leistungsdichte steigern zu können. Stichwortartig können folgende Punkte aufgeführt werden, welche die künftigen Entwicklungsschritte von SBE in Zusammenarbeit mit den Partnern der Materialentwicklung umreissen:

- Gd muss durch ein alternatives magnetokalorisches Material ersetzt werden, wobei sich durch den damit realisierbaren mehrstufigen Betrieb eine deutlich höhere Effizienz erreichen lässt bei gleichzeitig niedrigeren Materialkosten.
- Es existieren bereits einige Materialien, die für zukünftige Anwendungen in Frage kommen könnten, jedoch ist die kommerzielle Herstellung komplexer Wärmetauscherstrukturen noch nicht sehr weit fortgeschritten.
- Durch Wärmeregeneration innerhalb des magnetokalorischen Wärmetauschers kann die zugeführte Wärme besser ausgenutzt werden, was die Effizienz weiter verbessert. Die zugeführten Fluidströme (Wärmeträger) sollten vom primären Wärmekreislauf (magnetokalorischer Wärmetauscher) abgekoppelt werden, damit die Prozessanbindung bzw. -integration vereinfacht wird. Dies bringt allerdings zusätzliche Druck- und Wärmeübertragungsverluste mit sich, die sich negativ auswirken.
- Da die neuen Materialien voraussichtlich mit schwächeren Magnetfeldern betrieben werden können, sind ebenfalls Kosteneinsparungen bei den Permanentmagnetsystemen zu erwarten.
- Falls die suboptimalen thermischen und mechanischen Eigenschaften der neuen Materialien bestehen bleiben, müssen diese durch entsprechende Massnahmen (Wärmetauscher-Bauweise, dünne Strukturen, strukturelle Steifigkeit etc.) möglichst kompensiert werden, damit die Effizienz bzw. die mechanische Integrität nicht darunter leidet.

Aufgrund der langjährigen und intensiven Zusammenarbeit mit Materialherstellern und entsprechenden Forschungsgruppen, ist SBE bestens aufgestellt, um die TMM-Technologie mit dem Einsatz von neuartigen Materialien zukünftig wiederum einen grossen Schritt weiterzubringen. Mit entsprechend gesteigerter Leistungsdichte und gleichzeitig reduzierten Materialkosten wird die TMM-Technologie technisch und wirtschaftlich deutlich an Attraktivität gewinnen.

Die oben erwähnten Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Wechsel auf neuartige Materialien bzw. der effiziente Betrieb dieser Materialien und die damit verbundene Komplexität des Prozesses deuten auf eine mehrjährige Entwicklungsdauer und signifikante finanzielle Investitionen hin. Für SBE ist klar, dass die nächste Entwicklungsphase nur mit finanzieller Unterstützung und zusätzlicher Manpower zu bewerkstelligen ist. Aus diesem Grund ist SBE bestrebt, in naher Zukunft einen schlagkräftigen Partner zu finden, um gemeinsam die nächsten Entwicklungsschritte in Angriff zu nehmen. Aktuell wird die Planung eines ersten Funktionsmusters (TMM K3) mit Fokus auf dem regenerativen Wärmetauscherprozess vorangetrieben, wobei insbesondere die Verfügbarkeit und die genauen Eigenschaften des magnetokalorischen Materials noch eine erhebliche Unsicherheit für eine Prognose in Bezug auf Wirkungsgrad und Leistungsdichte darstellen.



7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Neben der intensiven Zusammenarbeit mit der FHNW arbeitete SBE im Rahmen des vorliegenden Projektes im Bereich der Materialentwicklung mit der TU Delft (NL) zusammen, um die Entwicklung neuartiger magnetokalorischer Materialien voranzutreiben. SBE ist aktuell als Industriepartner in einem Materialforschungsprojekt der TU Delft involviert, welches noch bis ca. 2023 läuft und u. a. vom *Dutch Research Council (NWO)*, <https://www.nwo.nl/en>) gefördert wird.

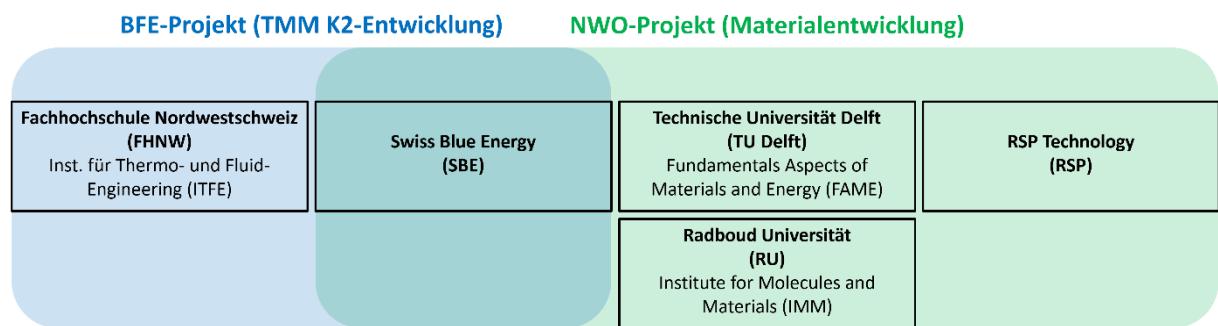


Abb. 51 Projektpartnerschaft

8 Literaturverzeichnis

Batashev, I., Wijs, G., & Brück, E. (2021). Computational screening of the magnetocaloric materials. In *Handbook of Magnetic Materials* (S. 1-39). E. Brück.

Jollet, S., & Krauss, S. (2020). *Entwicklung einer Pilotanlage des Thermo-Magnetischen Motors (TMM) zur Umwandlung von Niedertemperatur-Abwärme*. Villigen, Bad Zurzach: BFE. Von ARAMIS: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=43178> abgerufen

You, X. (2020). *Design of efficient magnetocaloric materials for energy conversion*. Delft: Delft University of Technology.