

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil I - Kurzbericht

TTB LB – Technologietransfer-Programm Leichtbau

Akronym: ALesteK

**Vorhabentitel: Anwendung kombinierter Leichtbaustrate-
gien für ein energieeffizientes Kühlkonzept**

Förderkennzeichen: 03LB1004A-C
Bewilligungszeitraum: 01.04.2021 - 31.12.2024
Projektkoordinator: Herr Michael Böhm
Projektform: Verbundprojekt

Zuwendungsempfänger:

FKZ:

Hugo Reckerth GmbH
Herr Michael Böhm
0711 / 722579-0
m.boehm@reckerth.de

03LB1004A

Roschiwal + Partner Ingenieur GmbH Augsburg
Herr Robert Widmann
0821 / 8007-250
r.widmann@roschiwal.de

03LB1004B

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Herr Michael Lorenz
0711 / 970-1281
michael.lorenz@ipa.fraunhofer.de

03LB1004C

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde im Rahmen des Projektform Technologietransfer-Programm Leichtbau mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03LB1004A-C gefördert. Die Projektbeteiligten danken dem BMWK für die gewährte Förderung und allen beteiligten Unternehmen für die Unterstützung.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

1. Aufgabenstellung

Am konkreten Beispiel des Gehäuses einer einzelnen Motorspindel mittlerer Leistungsdichte soll gezeigt werden, dass durch den intelligenten Einsatz konstruktiver Leichtbauprinzipien, neben der obligatorischen Gewichtsreduktion von ca. 45 % (75 % Aluminium, 25 % Kupfer) bis zu 65 % (100 % Aluminium) auch weitere Effekte erzielt werden können, die zusätzliche Energieeinsparungen – unter anderen durch den Entfall des Kühlaggregates – ermöglichen. Bei Werkzeugmaschinen sind allein durch den Wegfall der Wärmepumpe Energieeinsparungen von 20 % bis 30 % des Anschlusswertes im Betrieb oder bis zu 70 % bezogen auf die Kühlleistung möglich. Ein als Hohlkörper gestalteter Kühlkörper (z. B. für einen Elektromotor) stellt eine klassische Leichtbaustruktur dar. Die zur Kühlung erforderlichen Strukturen können so ausgeführt werden, dass sie neben einer optimalen Kühlwirkung durch große Oberflächen auch die notwendigen mechanischen Eigenschaften des Bauteils erfüllen. Zudem können im Leichtbau übliche Gitter- oder Netzstrukturen aufgrund ihrer geringen Materialquerschnitte zur Reduzierung des Wärmeflusses eingesetzt werden. Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Realisierung von Bauteilen, die sowohl wärmetechnisch als auch mechanisch optimiert sind. Mit dieser Fertigungstechnik können nicht nur optimale Kühlkörpergeometrien erzeugt, sondern auch weitere benötigte Konstruktionselemente – wie die für eine Luftkühlung erforderlichen Gebläse – optimal integriert werden. Darüber hinaus kann durch gezielt eingesetzte hybride Werkstoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit die Wärmeleitung und damit die Wärmeverteilung bei Bedarf partiell optimiert werden. **Abbildung 1** zeigt die wesentlichen Komponenten der Motorspindel.

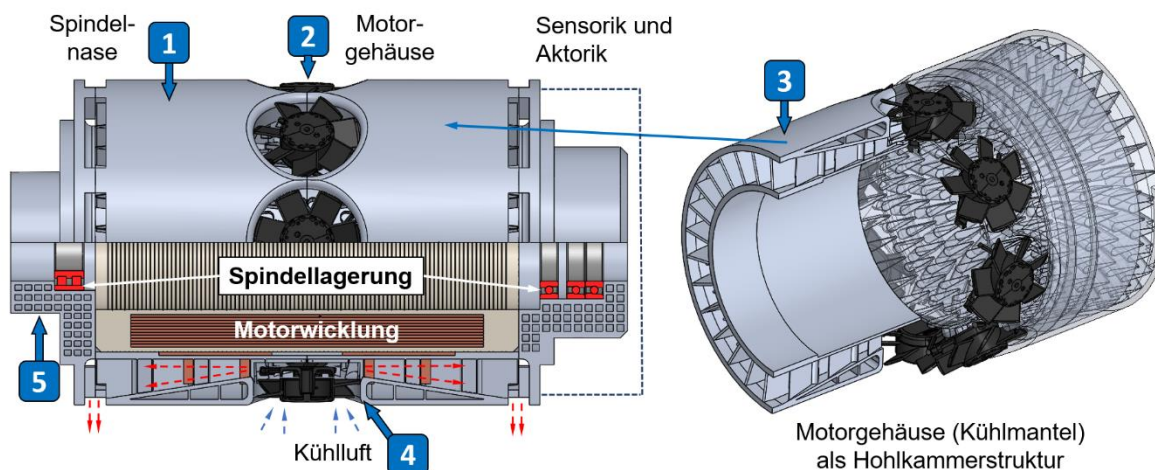


Abbildung 1: Konzeptskizze - Einsatz konstruktiver Leichtbaumerkmale zur Spindeltemperierung

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Ressourcenverknappung bei gleichzeitig steigendem Energiebedarf zwingt nahezu alle Industriebereiche zu einem Umdenken. Schätzungen zufolge wird der Energieverbrauch bis 2050 um bis zu 25 % zunehmen, während die Strompreise steigen und gesetzliche Restriktionen strenger werden. Werkzeugmaschinen für abtragende Fertigungsverfahren stellen eine zentrale Komponente im Maschinenbau dar. Diese Anlagen verfügen über zahlreiche Antriebe und Hilfsaggregate, die einen hohen Energiebedarf aufweisen.

Eine Schlüsselkomponente solcher Anlagen ist die Motorspindel, die maßgeblich die Fertigungsgenauigkeit und Produktivität beeinflusst. Während der Bearbeitung erzeugen Antriebe, Motoren, Spindeln und umliegende Komponenten Wärme, die gezielt und schnell abgeführt werden muss, um die thermische Stabilität und Maßgenauigkeit der bearbeiteten Werkstücke zu gewährleisten. Andernfalls kann Überhitzung zu einer Reduzierung des Gesamtwirkungsgrads, der nutzbaren Leistung oder der Lebensdauer einzelner Komponenten führen. Motorspindeln mittlerer und höherer Leistungsklassen werden heutzutage über externe Kühlaggregate gekühlt. Dabei kommen klassische Wärmepumpensysteme zum Einsatz, deren flüssigkeitsgefüllter Primärkreislauf über ein Leitungssystem mit dem Wärmetauscher der Motorspindel verbunden ist. Die Wärme wird über die Kühlflüssigkeit von der Motorspindel durch eine Wärmepumpe und einen Sekundärkreislauf zu einem zweiten, luftgekühlten Wärmetauscher geleitet, der die Abwärme an die Umgebungsluft abgibt. Die Kühlaggregate, die an Werkzeugmaschinen für das Temperaturmanagement von Motorspindeln, Motoren, Hydraulik und Kühlschmierstoffen eingesetzt werden, sind zusammen für mehr als drei Viertel des Energieverbrauchs verantwortlich und zählen damit zu den größten Energieverbrauchern einer Fertigungsanlage.

Die additive Fertigung eröffnet neue Möglichkeiten in der Konstruktion und Realisierung von Leichtbaukomponenten, die mit herkömmlichen Fertigungsverfahren nicht oder nur mit hohem technischem und finanziellem Aufwand realisierbar sind. Sie ermöglicht nicht nur komplexe Geometrien in Leichtbauweise, sondern auch die Integration weiterer benötigter Funktionalitäten bei geeigneter Konzeption.

Das Projekt nutzt diese Vorteile und implementiert eine neuartige Luftkühlung für Motoren und Motorspindeln mit hohen Leistungswerten, die durch geschickte Anwendung von Leichtbauprinzipien und -merkmalen als funktionsintegriertes System realisiert wird. Beispiele hierfür sind die hohe Wärmeleitfähigkeit von Leichtmetallen, die Kühlwirkung großer Oberflächen und eine verringerte Wärmeleitung durch reduzierte Querschnittsflächen.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Verbundstruktur zur Umsetzung der Projektidee wird entsprechend den Schlüsselkompetenzen der Projektpartner aufgeteilt. Der ausgearbeitete Arbeitsplan des Forschungsvorhabens, aufgeteilt nach Arbeitspaketen, Meilensteinen und kritischen Punkten (Abbruchzeitpunkten), ist in **Abbildung 2** dargestellt.

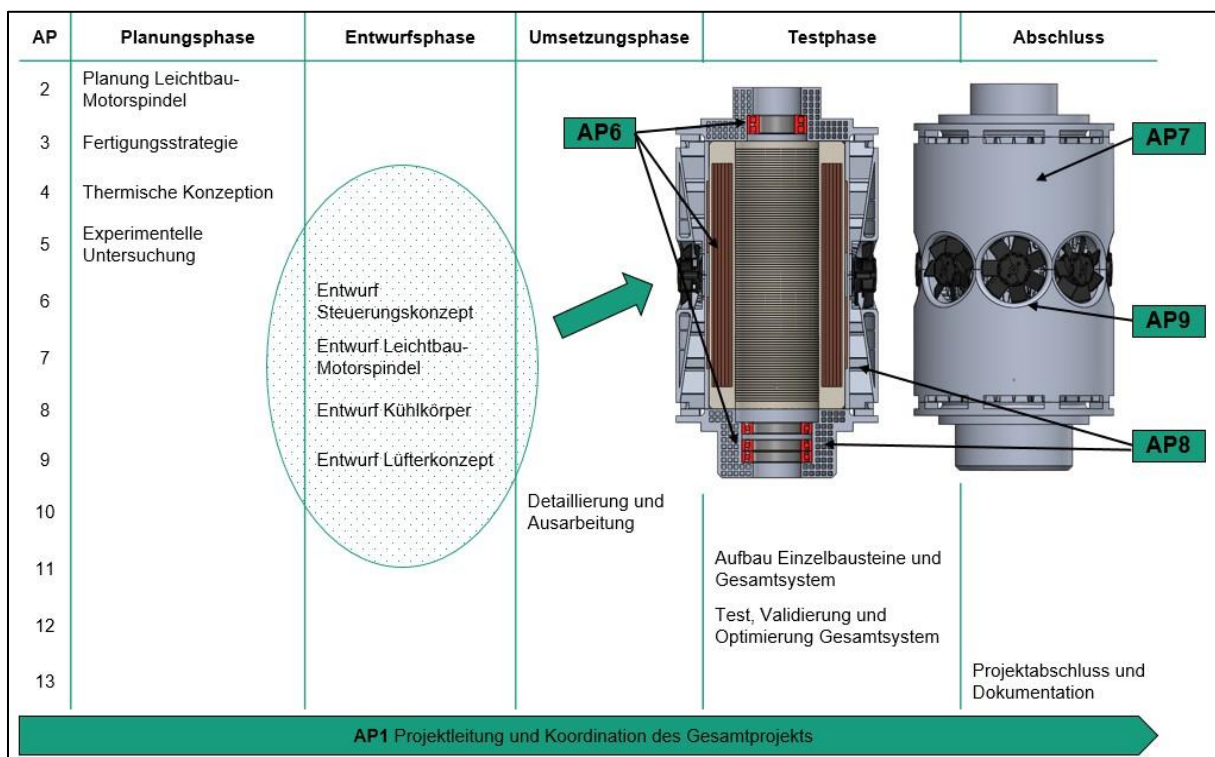


Abbildung 2: Darstellung der geplanten Tätigkeiten und Arbeitspaketen (AP)

Das **Fraunhofer IPA** übernimmt die Projektkoordination und die Überwachung des gesamten Forschungsvorhabens. Weiterhin beschäftigt es sich schwerpunktmäßig mit der

Simulation, den unterschiedlichen Konzepten der Kühlkörper und Lüfter und realisiert die Konzeption dieser Komponenten sowie deren experimentelle Validierung.

Darauf aufbauend fokussiert sich **Roschiwal** auf die Entwicklung und Konzeption des Spindelgehäuses. Dabei auftretende Fertigungs- und prozesstechnische Fragestellungen bezüglich der additiv herzustellenden Komponenten werden in Zusammenarbeit mit der Hochschule Aalen als assoziiertem Partner gelöst, die zudem die Herstellung der Komponenten übernimmt.

Die Zusammenführung des Gesamtkonzeptes der Leichtbau-Motorspindel sowie die Planung und Entwurfsausarbeitung des Gehäuses übernimmt **Reckerth** und leistet dabei einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg des gesamten Forschungsvorhabens. **Abbildung 3** stellt den Arbeitsplan des Forschungsvorhabens dar.

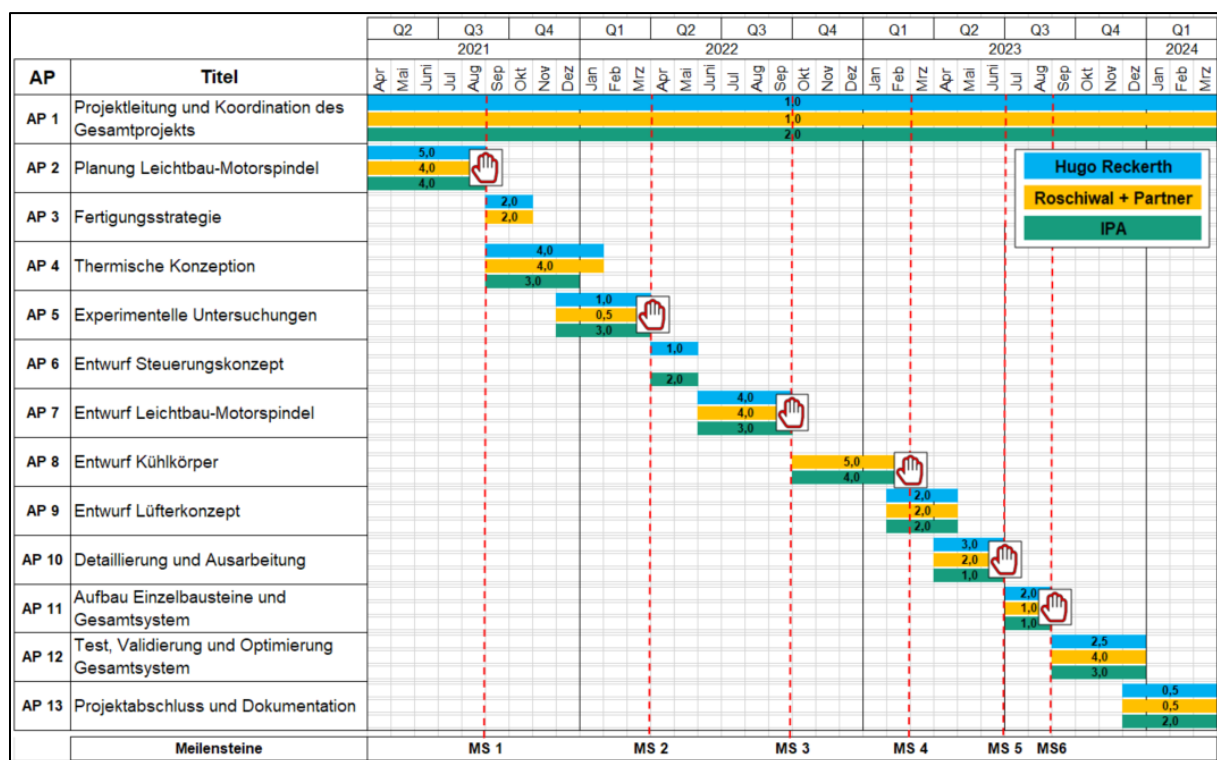


Abbildung 3: Arbeitsplan

Teil I: Kurzbericht

Wissenschaftlicher und technischer
Stand, an den angeknüpft wurde

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Der Stand der Wissenschaft und Technik sowie bekannte Schutzrechte bei der Projektantragstellung und während der Projektarbeit bieten Ansätze zur Reduzierung der Energie- und Betriebskosten von Werkzeugmaschinen. **Abbildung 4** stellt eine Übersicht der gefundenen Patente auf. Es lagen sechs Schutzrechte vor (siehe **Abbildung 4**, grau markierte Felder), die das Thema einer effektiveren Systemkühlung betreffen, jedoch wurden keine Patentschriften identifiziert, die dem grundlegenden Projektziel negativ entgegenwirken.

[illegible]

Abbildung 4: Ergebnisse der Patentrecherche auf Basis der Einschränkung von Patentklassen

Viele Schutzrechte erfordern einen großen Bauraum für Ventilatoren oder Lüfter, dass die Einsatzmöglichkeiten in einer Motorspindel im spanenden Umfeld (z. B. als Frässpindel)

signifikant einschränken. In Bearbeitungszentren steht nur ein begrenzter Platz für die Motorspindel und zusätzliche Komponenten zur Verfügung. Jegliche geometrische Erweiterung würde den Freiheitsgrad der Bearbeitungs-maschinen negativ beeinflussen.

Des Weiteren wurden Schutzrechte gesichtet, die das Herstellungsverfahren eines Wärmetauschers durch generative Verfahren (Patent EP 3 421 916 A1, 2018) und Verfahren zur Reduzierung des Wärmeeintrags einer Motorspindel (Patent DE 10 2007 021 140 A1) betreffen. Zudem wurde ein Patent identifiziert, das eine Werkzeugmaschine mit gekühlter Motorspindel durch ein gasförmiges Kühlmedium unter Verwendung unmittelbar längs platzierter Kühlflächen der Statorbleche umsetzt (Patent DE 38 44 337 A1). Diese Quellen zeigen, dass bereits Bestrebungen zur Realisierung luftgekühlter Motorspindeln existieren, jedoch keine durchgängige Optimierung durch Leichtbautechnologien.

Die gesichteten Patente wurden sich nur auf eine sehr vereinfachte Kühlrippengeometrie berufen, die aber auf Grundlage der wechselhaften Belastungszyklen der Motorspindel mit vielen Drehzahl- und Drehmomentsprüngen und den damit verbundenen Wärmespitzen nicht entsprechend abgebaut werden können. Zumal nur ein sehr geringer Teil der Wärmeströme auch von den ganzen Kühlrippen aufgenommen und an die Umgebung abgegeben wird. Vielmehr sinkt der Temperaturgradient in Abhängigkeit der Rippenhöhe exponentiell.

Bereits bekannte Konstruktionen zur Regelung durch ein Heißgas-Bypass-Ventil arbeiten im Vergleich zu herkömmlichen wassergekühlten Systemen energie-sparsamer. Dieser Lösungsansatz nutzt eine spezielle Ventilsteuerung für Motor-spindeln und allgemeine Systeme, die eine Kompressorkühlung erfordern. Der ALesteK-Lösungsansatz negiert die Notwendigkeit einer Kompressorkühlung.

Im Forschungsvorhaben „NC-Plus“ wurde eine aktive Luftkühlung adressiert, wobei die Kernidee ein externes Luftkühlsystem ist, das die Wärme aus der Motorspindel direkt an die Umgebung abgibt. Dadurch kann der Einsatz eines Kompressors eingespart werden, was Energieeinsparungen von ca. 70 % im Vergleich zu kompressor-betriebenen Kühlsystemen ermöglicht. ALesteK sieht vor, keine externen Kopplungs-systeme zu nutzen, sondern alle erforderlichen Komponenten direkt zentral an die Motorspindel zu verankern.

Dadurch werden mögliche Rohrleitungsverluste minimiert und zusätzliche Rohrleitungskomponenten nicht erforderlich.

Fazit: Während der Projektlaufzeit wurde durchgehend eine Recherche zum Stand der Technik und Wissenschaft durchgeführt sowie vorhandene Schutzrechte und Verfahren gesichtet und ausgewertet. Es wurde jedoch kein Verfahren, keine Konstruktion und kein Schutzrecht im Projekt verwendet.

4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzen Informations- und Dokumentationsdienste

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Quellen der Fachliteratur aufgeführt, die maßgeblich zur Durchführung des Projekts beigetragen haben. Neben diesen ausgewählten Arbeiten wurden zahlreiche weitere Quellen konsultiert, deren Beitrag zum Ergebnis jedoch geringer war. Die nachfolgend präsentierten Literaturstellen bieten eine fundierte Basis für die in diesem Projekt behandelten Fragestellungen und unterstreichen die wissenschaftliche Relevanz der durchgeführten Forschung.

Fachliteratur:

- Koch, Lukas, et al. "Coupled thermal and fluid mechanical modeling of a high speed motor spindle." *Applied Mechanics and Materials* 871 (2017): 161-168.
- Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017.
- Hirsch, A.: Werkzeugmaschinen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2016.
- Arnd Struve: Generatives Design zur Optimierung additiv gefertigter Kühlkörper. Springer Vieweg 2021.
- Lange, F.: Prozessgerechte Topologieoptimierung für die Additive Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2021.
- Augenstein, E.; Nelles, J.; Wurm, A.: Energieeffiziente Kühlsysteme für Werkzeugmaschinen-Konzept für eine bedarfsorientierte Kühlwasserversorgung. *wt werkstattstechnik online* Jahrgang 102 (2012) H. 5

- Denkena, Berend; Abele, Eberhard; Brecher, Christian; Dittrich, Marc-André; Kara, Sami; Mori, Masahiko (2020): Energy efficient machine tools. In: *CIRP Annals* 69 (2), S. 646–667. DOI: 10.1016/j.cirp.2020.05.008.
- Denkena, Berend; Bergmann, Benjamin; Lepper, Thomas (2017): Design and optimization of a machining robot. In: *Procedia Manufacturing* 14, S. 89–96. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.11.010.
- Shabi, Linart; Weber, Juliane; Weber, Jürgen (2017): Analysis of the Energy Consumption of Fluidic Systems in Machine Tools. In: *Procedia CIRP* 63, S. 573–579. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.348.
- Shabi, Linart; Weber, Juliane; Weber, Jürgen (2018): Simulative Study of Different Control Concepts of Cooling System for Machine Tools. In: *MATEC Web Conf.* 220, S. 8002. DOI: 10.1051/mateconf/201822008002.
- Denkena, Berend, Benjamin Bergmann, and Heinrich Klemme. "Cooling of motor spindles—a review." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 110.11 (2020): 3273-3294.
- Weber, Dipl.-Ing. Juliane, Ing. Harald Lohse, and Ing. Jürgen Weber. "Thermo-energetic Analysis of the Fluid Systems in Cutting Machine Tools." (2016).
- Weber, Juliane, Linart Shabi, and Jürgen Weber. "Thermal impact of different cooling sleeve's flow geometries in motorized high-speed spindles of machine tools." *Fluid Power Systems Technology*. Vol. 50473. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC). *Vdi-Wärmeatlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- Denkena, B., Bergmann, B., & Klemme, H. (2020). Cooling of motor spindles—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(11), 3273-3294.
- Gebert, Karl. *Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnell-drehenden Motorspindeln*. Shaker, 1997.

- Denkana, B. "Methodology for thermal optimization of motor spindles." *Special Interest Group Meeting on Machine Tools and Production Engineering (WZL) of RWTH Aachen, Germany*. 2020.
- Denkena, B., et al. "Effiziente Fluidtechnik für Werkzeugmaschinen." *Ermittlung und Reduktion des Energiebedarfs am Beispiel des Kühlwassersystems. wt Werkstattstechnik online* 101.5 (2011): 347-352.
- Denkena, B., et al. "Cooling potential of heat pipes and heat exchangers within a machine tool spindle." *Proceedings, CIRP Sponsored Conference on Thermal Issues in Machine Tools, Dresden*. 2018.
- Bauer, David. *Verlustanalyse bei elektrischen Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge zur Weiterverarbeitung in thermischen Netzwerkmodellen*. Springer-Verlag, 2018.
- Binder, Andreas. *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Grundlagen, Betriebsverhalten. Vol. 2. Berlin: Springer, 2012.

Im Rahmen des ALesteK-Verbundprojektes wurden verschiedene **Informations- und Dokumentationsdienste** genutzt, um relevante Fachliteratur und technische Informationen zu recherchieren. Dazu gehören unter anderem IEEE Xplore, SpringerLink, ScienceDirect und Google Scholar. Darüber hinaus wurden die technischen Bibliotheken des Fraunhofer IPAs sowie der Universität Stuttgart genutzt. Zusätzlich zu den genannten Diensten wurden weitere Online-Plattformen und Fachportale konsultiert.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des ALesteK-Verbundprojektes wurde auch mit verschiedenen externen Stellen zusammengearbeitet, um die Projektziele zu fördern und Synergien zu nutzen. Die Hochschule Aalen war ein wesentlicher Partner (ebenfalls assoziierter Partner) bei der Herstellung additiv gefertigter Komponenten. Durch die enge Zusammenarbeit konnten akademische Erkenntnisse direkt in die praktische Umsetzung des Forschungsvorhabens umgesetzt werden. Dies beinhaltete regelmäßige Abstimmungen und den Austausch von Fachwissen innerhalb gemeinsamer Besprechungen. Der Kontakt zu anderen Forschungs-

einrichtungen und Universitäten (z. B. Universität Stuttgart oder Universität Bayreuth) förderte den Austausch von Ideen und die Diskussion über aktuelle Entwicklungen im Bereich der Kühltechnologien bei Motorspindeln.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teil II - Sachbericht

TTB LB – Technologietransfer-Programm Leichtbau

Akronym: ALesteK

**Vorhabentitel: Anwendung kombinierter Leichtbaustrate-
gien für ein energieeffizientes Kühlkonzept**

**Teilvorhaben: Rechnerische und experimentelle Entwick-
lung eines Kühlkörpers am Beispiel einer Leichtbau-Motor-
spindel**

Förderkennzeichen:	03LB1004A-C
Bewilligungszeitraum:	01.04.2021 – 31.12.2024
Projektkoordinator:	Herr Michael Böhm
Projektform:	Verbundprojekt

Zuwendungsempfänger:

FKZ:

Fraunhofer IPA
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Michael Lorenz
0711 / 970-1281
michael.lorenz@ipa.fraunhofer.de

03LB1004C

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde im Rahmen des Projektform Technologietransfer-Programm Leichtbau mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03LB1004A-C gefördert. Die Projektbeteiligten danken dem BMWK für die gewährte Förderung und allen beteiligten Unternehmen für die Unterstützung.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Technische Lösungsstrategie	2
2	Stand der Wissenschaft und Technik	5
3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
3.1	AP1: Projektleitung und Koordination des Gesamtprojekts	11
3.2	AP2: Planung Leichtbau-Motorspindel.....	14
3.3	AP4: Thermische Konzeption	23
3.4	AP5: Experimentelle Untersuchungen.....	30
3.4.1	Untersuchung kleiner Kühlproben.....	31
3.4.2	Heatpipe Untersuchungen	32
3.4.3	Rippenuntersuchungen.....	35
3.5	AP6: Steuerungskonzept.....	42
3.6	AP7: Entwurf Leichtbau-Motorspindel	44
3.7	AP8: Entwurf Kühlkörper	47
3.8	AP9: Entwurf Lüfterkonzept.....	68
3.9	AP10: Detailierung und Ausarbeitung	71
3.10	AP11: Aufbau Einzelbausteine und Gesamtsystem.....	75
3.11	AP12: Test, Validierung und Optimierung Gesamtsystem.....	78
3.12	AP13: Projektabschluss und Dokumentation.....	81
4	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	83
5	Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten..	83
6	Voraussichtlicher Nutzen	85

7	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt	87
8	Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einsparpotential	2
Abbildung 2: Konzeptskizze - Einsatz konstruktiver Leichtbaumerkmale zur Spindeltemperierung.....	3
Abbildung 3: Ergebnisse der Patentrecherche auf Basis der Einschränkung von Patentklassen.....	7
Abbildung 4: Darstellung der geplanten Tätigkeiten und Arbeitspakten (AP)	9
Abbildung 5: Arbeitsplan.....	10
Abbildung 6: Teilausschnitt der durchgeführten Marktrecherche verfügbarer Lüfter (Axial und Radial)	12
Abbildung 7: Motorspindel-Prüfstand und Aufzählung mit wesentlichen Bauteilen und Baugruppen.....	12
Abbildung 8: Kühlkörper-Prüfstand und Aufzählung mit wesentlichen Bauteilen und Baugruppen.....	13
Abbildung 9: Schnittansicht Referenzmotorspindel RF-HSK-B80 175/175x510 16/55.	15
Abbildung 10: Überblick des modifizierten Simulationsmodell zur Untersuchung einer luftgekühlten Motorspindel. Darstellung der verwendeten Materialien (oben) und Darstellung der Randbedingungen und Wärmeströme (unten).....	16
Abbildung 11: Übersicht der Werkstoffe und resultierende effektive Rauigkeitswerte der Werkstoff-kombinationen	17
Abbildung 12: Überblick Verluste in Abhängigkeit der Verlustquelle	19
Abbildung 13: Temperaturfeld in Abhängigkeit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten am Einlass bei 20 °C Einlasstemperatur.....	19
Abbildung 14: normierte (gemittelte) Temperaturen im S1-Modus in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit	20
Abbildung 15: Wärmeübergangskoeffizient in Variation der normierten Oberfläche des Kühlgehäuses	21
Abbildung 16: Wärmeübergangskoeffizient in Variation der normierten Oberfläche des Kühlgehäuses	24
Abbildung 17: Vergrößerung des gesamten Kühlgehäuses über die vollständige Motorspindellänge.....	24
Abbildung 18: Aufgabenverteilung des Motorspindel-Gehäuses	25

Abbildung 19: Entwurf V3b: Kühlmantel lang.....	26
Abbildung 20: Entwurf V3b: Kühlmantel lang.....	27
Abbildung 21: V2c: Kühlmantel Bleche radial, V3e: Kühlmantel lang (Rohr)	28
Abbildung 22: Erste additiv hergestellte Prüfkörper.....	31
Abbildung 23: angepasster Versuchsaufbau zur Ermittlung der thermischen Eigenschaften der Heatpipes	32
Abbildung 24: Ergebnisdarstellung der Heatpipe-Untersuchung in Abhängigkeit des Durchmessers und Einspannlänge	33
Abbildung 25: Zusammenfassung der Heatpipe-Untersuchung	34
Abbildung 26: Zielsetzungen der Rippen-Untersuchungen	35
Abbildung 27: grundlegender Versuchsaufbau (Untersuchungsziel 1 und 2).....	35
Abbildung 28: Zeitrafferaufnahme mittels Wärmebildkamera	36
Abbildung 29: Ergebnisse der ersten beiden Untersuchungszielen.....	37
Abbildung 30: grundlegender Versuchsaufbau	38
Abbildung 31: Temperaturverlauf vs. Versuchsdauer der Untersuchungsziele 4 und 5	38
Abbildung 32: Wärmeabgabe mit und ohne Ventilator vs. Versuchsdauer der Untersuchungsziele 4 und 5	39
Abbildung 33: Versuchsaufbau zur Ermittlung maximaler Rippendichte.....	39
Abbildung 34: Ausschnitt der Versuchsanordnung bei einer Rippenanzahl von 5, 9, 15 und 20.....	40
Abbildung 35: Ausschnitt der Versuchsergebnisse mit Rippenanzahl von 9, 15 und 20	41
Abbildung 36: Prozentuale Abweichung zwischen Versuch und Simulation.....	41
Abbildung 37: Beispiel einer Konzeptidee: zentral eingebettet in Befestigungsflansch, hinterer Spindelbereich	43
Abbildung 38: Ausschnitt der Übersicht möglicher Lüfter in Abhängigkeit der Lüfteranzahl und des minimal erforderlichen Volumenstroms	43
Abbildung 39: Vorderer Spindelgehäuse.....	45
Abbildung 40: V4.1: Gehäuse 3	46
Abbildung 41: Temperaturdifferenz zwischen Kühlgehäuse und Rippe bei Variation der Rippenbreite	48

Abbildung 42: Gegenüberstellung der Temperaturdifferenz der Rippe (Max - Min) und der des Kühlgehäuses zur Rippe	49
Abbildung 43: Grundlegender Simulationssaufbau und Ergebnisdarstellung des Geschwindigkeits- und Temperaturverlaufes einer Eingangsgeschwindigkeit	50
Abbildung 44: Normierte Temperatur des Kühlgehäuses (Grundplatte) auf 80 °C in Abhängigkeit von einer Rippe, einer Rippenanzahl von 14 und einer halben Rippenlänge	51
Abbildung 45: Wärmeabgabe in Abhängigkeit der Linienpfadlänge und Strömungsgeschwindigkeit des Lüfters	51
Abbildung 46: Rahmenbedingungen und Berechnungsmodell zur Ermittlung maximaler Rippendichte	52
Abbildung 47: Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Rippenabstände	52
Abbildung 48: Temperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher Rippenabstände	53
Abbildung 49: Darstellung der prozentualen Geschwindigkeitsunterschiede bezogen auf die Eingangsgeschwindigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Rippenabstände	53
Abbildung 50: Modellaufbau und Randbedingungen zur Analyse der Temperaturverteilung im vorderen Spindelbereich der Leichtbau-Motorspindel	54
Abbildung 51: Ausgangsdesign zur Untersuchung des vorderen Spindelbereiches unter Belastung des Hauptlagers und Werkzeuges	55
Abbildung 52: Design mit zusätzlichen radialen Rippen zur Untersuchung des vorderen Spindelbereiches unter Belastung des Hauptlagers und Werkzeuges	55
Abbildung 53: Design mit zusätzlichen radialen Rippen und Vergrößerung des Durchmessers des Lagergehäuses zur Untersuchung des vorderen Spindelbereiches unter Belastung des Hauptlagers und Werkzeuges	56
Abbildung 54: Simulationsmodell zur Analyse des Spindelgehäuses und hinteren Spindelbereich	57
Abbildung 55: Strömungsgeschwindigkeitsverlauf von zwei Lüftern des Kühlgehäuses und des hinteren Spindelbereiches	58
Abbildung 56: Strömungsgeschwindigkeitsverlauf von zwei Lüftern des Kühlgehäuses und des hinteren Spindelbereiches und einer zusätzlichen Blechumhausung zur Verbesserung der Kühlung im hinteren Spindelbereiches	59

Abbildung 57: Luftführungskomponenten zur Verbesserung der Kühlung im hinteren Spindelbereich	59
Abbildung 58: Strömungsgeschwindigkeitsverlauf von zwei Lüftern des Kühlgehäuses und des hinteren Spindelbereiches und einer zusätzlichen Luftführung zur Verbesserung der Kühlung im hinteren Spindelbereiches.....	60
Abbildung 59: V4.4.4: Kühlung mit Radiallüfter (link), V4.4.3. Kühlung mit Axiallüfter (rechts)	61
Abbildung 60: V3b: Kühlmantel Zylinder radial (link), V3c: Kühlmantel Zylinder diagonal (rechts)	62
Abbildung 61: V3b: Kühlmantel Zylinder radial SPZ 160.....	63
Abbildung 62: V4: Gehäuse Lüfter 80 mm Mantel (links), V4: Gehäuse Lüfter 80 mm Schweißteil	64
Abbildung 63: V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160 (link), V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160 (2)	65
Abbildung 64: V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (links), V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (2) (rechts)	65
Abbildung 65: V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (3) (links), V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (4) (rechts).....	66
Abbildung 66: V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (5)	67
Abbildung 67: einzelne Designstufen zum Erreichen eines idealen Lüfter-konzeptes der Leichtbau-Motorspindel	70
Abbildung 68: einzelne Designstufen der Leichtbau-Motorspindel	71
Abbildung 69: primärer Kühlkörper (links) und Kühlkörper für hintere Spindeleinheit (rechts)	72
Abbildung 70: Darstellung einzelner Designs der Leichtbau-Motorspindel	73
Abbildung 71: Darstellung der Luftführung für die hintere Kühleinheit	74
Abbildung 72: 3d-gedruckte Bauteile der Leichtbau-Motorspindel	76
Abbildung 73: Leichtbau-Motorspindel.....	77
Abbildung 74: Leichtbau-Motorspindel befestigt an einen Industrieroboter	78

1 Ausgangslage

1.1 Problemstellung

Ressourcenverknappung bei gleichzeitig steigendem Energiebedarf führt in nahezu allen Industriebereichen zu einem Umdenken. Nach Schätzungen ist davon auszugehen, dass der Energieverbrauch bis 2050 um bis zu 25 % zunimmt, bei gleichzeitig wachsenden Strompreisen und strengeren gesetzlichen Restriktionen und Vorschriften¹.

Wichtige Komponenten des Maschinenbaus sind Werkzeugmaschinen oder robotergetriebene Fertigungssysteme für abtragende Fertigungsverfahren. Diese Anlagen weisen zahlreiche Antriebe und Hilfsaggregate mit hohem Energiebedarf auf. Eine der Schlüsselkomponenten solcher Anlagen ist die Motorspindel. Diese beeinflusst maßgeblich Fertigungsgenauigkeit und Produktivität. Während der Bearbeitung generieren Antriebe, Motoren, Spindel und umliegende Komponenten Wärme, die gezielt und schnell abgeführt werden muss, um die thermische Stabilität sowie die Maßgenauigkeit der bearbeiteten Werkstücke zu gewährleisten. Andernfalls können durch Überhitzung der Gesamtwirkungsgrad, die nutzbare Leistung oder die Lebensdauer einzelner Komponenten reduziert werden. Motorspindeln mittlerer und höherer Leistungsklassen werden heute über ein externes Kühlaggregat temperiert. Als Kühlaggregate werden klassische Wärmepumpensysteme eingesetzt, deren flüssigkeitsgefüllter Primärkreislauf über ein Leitungssystem mit dem Wärmetauscher der Motorspindel verbunden ist. Die Wärme wird über die Kühlflüssigkeit von der Spindel über Wärmepumpe und Sekundärkreislauf zu einem zweiten, luftgekühlten, Wärmetauscher geführt, der die Abwärme an die Luft abgibt. Die an Werkzeugmaschinen eingesetzten Kühlaggregate für die Temperierung von Spindeln, Motoren, Hydraulik und Kühlschmierstoff sind zusammen für mehr als Dreiviertel des Energieverbrauchs verantwortlich und gehören damit zu den größten Energieverbrauchern einer Fertigungsanlage².

¹ EIA, 2019: *Energieverbrauch der Industrie weltweit im Jahr 2018 und Prognose bis 2050 (in Milliarden BTU)*. Statista. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/321213/umfrage/energieverbrauch-der-industrie-weltweit/>

² Brecher, Christian; et.al. 2010. Ressourceneffizienz von Werkzeugmaschinen im Fokus der Forschung: Effizienzsteigerung durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb.

1.2 Zielsetzung

Die additive Fertigung erlaubt neue Wege bei Konstruktion und Realisierung von Leichtbaukomponenten, die mit bisherigen Fertigungsverfahren nicht oder nur mit hohem technischem und finanziellem Aufwand möglich waren. Es sind damit nicht nur komplexe Geometrien in Leichtbauweise möglich, gleichzeitig können diese auch bei geeigneter Konzeption mit weiteren benötigten Funktionalitäten ausgestattet werden. Das Projekt greift diese Vorteile auf und setzt eine neuartige Luftkühlung für Motoren mit hohen Leistungswerten um, welche durch geschickte Nutzung von Leichtbauprinzipien und -charakteristika als funktionsintegriertes System ausgeführt wird. Als Beispiele für diese Nutzung können die gute Wärmeleitfähigkeit von Leichtmetallen, die Kühlwirkung großer Oberflächen und eine verminderte Wärmeleitung durch reduzierte Querschnittsflächen genannt werden. **Abbildung 1** führt die Einsparpotentiale von Rohstoff (Gehäusemasse), die notwendige Kühlenergie und resultierende CO₂-Werte am Beispiel einer einzelnen Motorspindel (MS) mittlerer Leistungsdichte auf. Dieses Beispiel zeigt, dass z. B. bei Werkzeugmaschinen oder Robotern so allein durch Wegfall der Wärmepumpe Energieeinsparungen von 20% bis 30% des Anschlusswertes im Betrieb oder bis zu 70% bezogen auf die Kühlleistung erzielt werden können³.

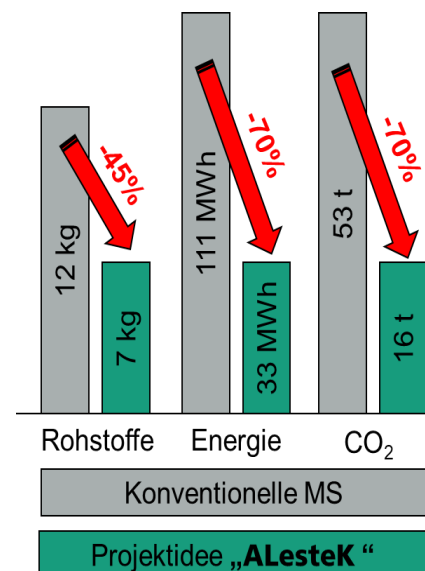


Abbildung 1: Einsparpotential

1.3 Technische Lösungsstrategie

Im Rahmen des Projektes wird am Beispiel des Gehäuses einer Motorspindel aufgezeigt, dass durch den intelligenten Einsatz konstruktiver Leichtbauprinzipien, neben der obligatorischen Gewichtsreduktion von ca. 45 % (75 % Aluminium, 25 % Kupfer) bis zu 65 %

³ Denkena, Berend; Möhring, Hans-Christian; Hackelöer, Felix, 2011.

Effiziente Fluidtechnik für Werkzeugmaschinen: Ermittlung und Reduktion des Energiebedarfs am Beispiel des Kühlsystems. wt Werkstatttechnik online 2011

(100 % Aluminium) auch weitere Effekte erzielt werden können, die zusätzliche Energieeinsparungen – unter anderen durch den Entfall des Kühlaggregates – ermöglichen. Ein als Hohlkörper gestalteter Kühlkörper (z. B. für einen Elektromotor) stellt eine klassische Leichtbaustruktur dar. Die zur Kühlung erforderlichen Strukturen können so ausgeführt werden, dass sie neben einer optimalen Kühlwirkung durch große Oberflächen auch die notwendigen mechanischen Eigenschaften des Bauteils erfüllen. Zudem können im Leichtbau übliche Gitter- oder Netzstrukturen aufgrund ihrer geringen Materialquerschnitte zur Reduzierung des Wärmeflusses eingesetzt werden. Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Realisierung von Bauteilen, die sowohl wärmetechnisch als auch mechanisch optimiert sind. Mit dieser Fertigungstechnik können nicht nur optimale Kühlkörpergeometrien erzeugt, sondern auch weitere benötigte Konstruktionselemente – wie die für eine Luftkühlung erforderlichen Gebläse – optimal integriert werden. Darüber hinaus kann durch gezielt eingesetzte hybride Werkstoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit die Wärmeleitung und damit die Wärmeverteilung bei Bedarf partiell optimiert werden.

Diese Punkte werden durch die Ausarbeitung eines thermischen Betriebskonzepts koordiniert, das auf die Anforderungen der Luftkühlung abgestimmt ist. **Abbildung 2** zeigt die wesentlichen Komponenten, die durch die nachfolgende Auflistung der Herausforderungen des Lösungsansatzes ergänzt werden.

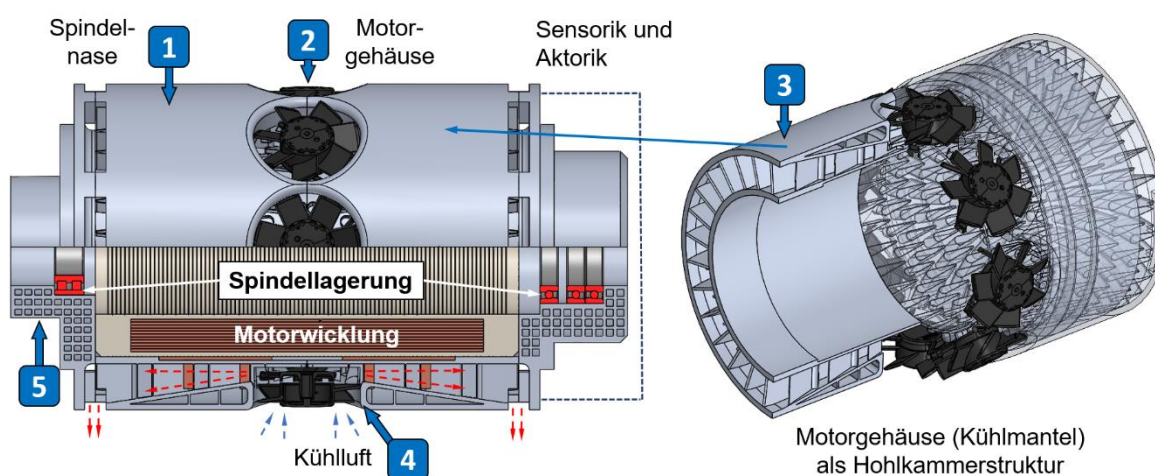


Abbildung 2: Konzeptskizze - Einsatz konstruktiver Leichtbaumerkmale zur Spindeltemperierung

- Motorgehäuse, vorderes und hinteres Lagerschild in Leichtbauweise
- Integriertes Lüftergehäuse erlaubt eine optimale Kühlluftführung
- optimierte und anforderungsgerechte Auslegung des Kühlkörpers und Kühlkanäle
- Erhöhte Wärmeleitung aus thermisch kritischen Bereichen durch hybriden Materialeinsatz
- Verminderte Wärmeleitung durch reduzierte Querschnitte erschweren die Entwicklung einer Leichtbaustrukturen
- Temperierung durch Innenbelüftung von Strukturen

In der Lösungsstrategie zur Umsetzung des Leichtbaus der hochdynamisch einsetzbaren Spindel werden innovative Wege zur Wärmeleitung, -dissipation und konstruktiven Umsetzung mittels neuer Fertigungsverfahren verankert.

Das dargestellte Realisierungsbeispiel aus **Abbildung 2** des neuen Motorspindelkonzeptes dient nur zur konzeptionellen Erläuterung der geplanten Vorgehensweise. Es stellt keinen Konstruktionsentwurf des durchgeführten Forschungsprojektes dar. In der Lösungsstrategie zur Umsetzung des Leichtbaus der hochdynamisch einsetzbaren Motorspindel werden innovative Wege zur Wärmeleitung, -dissipation und konstruktiven Umsetzung mittels neuer Fertigungsverfahren verankert. Eine ausführliche schriftliche Erläuterung der Projekthinhalte kann im dargelegten Arbeitsplan entnommen werden. In dieser Vorhabenbeschreibung werden nur Schlaglichter auf dieses neue Motorspindelkonzept gesetzt, so dass wesentliche Konzeptmerkmale nachvollzogen werden können. Der hier nicht beschriebene Stand der Motorspindeltechnik wird hinsichtlich Leistungs- und Genauigkeitsanforderungen selbstverständlich im Konzept und dessen Realisierung berücksichtigt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Stand der Wissenschaft und Technik bietet unterschiedliche Ansätze zur Reduzierung der Energie- oder Betriebskosten einer Werkzeugmaschine.

Ein Lösungsansatz ist die Regelung der Kompressorkühlung durch ein Heißgas-Bypass-Ventil. Heißgas-Bypass-Systeme kommen bei hohen Genauigkeitsanforderungen oder kleinen Tankkapazitäten zum Einsatz. Herkömmlich betriebene Kompressorkühlsysteme sind konstruktionsbedingt auf 10 bis 12 Schaltvorgänge pro Stunde limitiert und können dadurch mögliche Temperaturschwankungen – beispielsweise durch prozessbedingte Spitzenlasten – schlechter ausgleichen. Die überschüssige Energiemenge wird durch den im Dauerbetrieb laufenden Verdichter zurück zu dessen Saugseite transportiert. Dies stellt eine kostengünstige Variante zwischen den Temperaturanforderungen und der Möglichkeit einer Steuerung und Regelung dar. Auf diese Weise lässt sich zwar das geforderte Temperaturniveau erreichen, jedoch wird bei Teillastbetrieb eine große Menge an generierter Arbeit ohne Nutzen als Abwärme dissipiert⁴.

Eine aktive Luftkühlung bildete den Schwerpunkt des Forschungsprojekts „NCplus“. Die Kernidee ist ein externes Luftkühlssystem, das die Wärme aus der Motorspindel direkt an die Umgebung abgibt. Dadurch kann der Einsatz eines Kompressors eingespart werden, das eine Energieeinsparungen von ca. 70 % im Vergleich zu einem kompressorbetriebenen Kühlsystem ermöglicht⁴. Darüber hinaus verläuft die Vorlauftemperatur deutlich gleichmäßiger im Vergleich zu einer Kompressorkühlung, sodass die Prozessqualität und Maschinengenauigkeit der WZM verbessert werden können. Allerdings werden nur Vorlauftemperaturen bis ca. 5 K über Raumtemperatur erreicht.

Das IFW Hannover entwickelte ein neuartiges Konzept zur passiven Kühlung über Konvektion einer Rotorwelle. Ziel des Vorhabens war die Verbesserung der Robustheit der Welle gegenüber thermischen Einflüssen. Dabei wird die Wärme der Rotorwelle ohne

⁴ Denkena, Berend; Möhring, Hans-Christian; Hackelöer, Felix, 2011.

Effiziente Fluidtechnik für Werkzeugmaschinen: Ermittlung und Reduktion des Energiebedarfs am Beispiel des Kühlsystems. wt Werkstatttechnik online 2011

Drehdurchführung durch Wärmerohre zu einem lamellenförmigen Wärmetauscher transportiert, der die Wärme über einen Luftspalt an statische Lamellen und das angebundene, konventionell gekühlte Gehäuse abführt⁵.

Der Stand der Wissenschaft und Technik sowie bekannte Schutzrechte bei der Projektantragstellung und während der Projektarbeit bieten Ansätze zur Reduzierung der Energie- und Betriebskosten von Werkzeugmaschinen. **Abbildung 3** stellt eine Übersicht der gefundenen Patente auf. Es lagen einige Schutzrechte vor (siehe **Abbildung 3**, grau markierte Felder), die das Thema einer effektiveren Systemkühlung betreffen, jedoch wurden keine Patentschriften identifiziert, die dem grundlegenden Projektziel negativ entgegenwirken.

Viele Schutzrechte erfordern einen großen Bauraum für Ventilatoren oder Lüfter, dass die Einsatzmöglichkeiten in einer Motorspindel im spanenden Umfeld (z. B. als Frässpindel) signifikant einschränkt. In Bearbeitungszentren steht nur ein begrenzter Platz für die Motorspindel und zusätzliche Komponenten zur Verfügung. Jegliche geometrische Erweiterung würde den Freiheitsgrad der Bearbeitungsmaschinen negativ beeinflussen.

Des Weiteren wurden Schutzrechte gesichtet, die das Herstellungsverfahren eines Wärmetauschers durch generative Verfahren (Patent EP 3 421 916 A1, 2018) und Verfahren zur Reduzierung des Wärmeeintrags einer Motorspindel (Patent DE 10 2007 021 140 A1) betreffen. Zudem wurde ein Patent identifiziert, das eine Werkzeugmaschine mit gekühlter Motorspindel durch ein gasförmiges Kühlmedium unter Verwendung unmittelbar längs platzierter Kühlflächen der Statorbleche umsetzt (Patent DE 38 44 337 A1). Diese Quellen zeigen, dass bereits Bestrebungen zur Realisierung luftgekühlter Motorspindeln existieren, jedoch keine durchgängige Optimierung durch Leichtbautechnologien.

⁵ Denkena, Berend; et al., 2019. *So entstört das IFW Hauptspindeln*. Verfügbar unter: <https://www.nc-fertigung.de/so-entstoert-das-ifw-hauptspindeln> Zugriff am: 25.04.2020

Abbildung 3: Ergebnisse der Patentrecherche auf Basis der Einschränkung von Patentklassen

Bereits bekannte Konstruktionen zur Regelung durch ein Heißgas-Bypass-Ventil arbeiten im Vergleich zu herkömmlichen wassergekühlten Systemen energie-sparsamer. Dieser Lösungsansatz nutzt eine spezielle Ventilsteuerung für Motor-spindeln und allgemeine Systeme, die eine Kompressorkühlung erfordern. Der ALesteK-Lösungsansatz negiert die Notwendigkeit einer Kompressorkühlung.

Fazit: Während der Projektlaufzeit wurde durchgehend eine Recherche zum Stand der Technik und Wissenschaft durchgeführt sowie vorhandene Schutzrechte und Verfahren gesichtet und ausgewertet. Es wurde jedoch kein Verfahren, keine Konstruktion und kein Schutzrecht im Projekt verwendet.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Verbundstruktur zur Umsetzung der Projektidee wird entsprechend der Schlüsselkompetenzen der Projektpartner aufgeteilt. Der ausgearbeitete Arbeitsplan des Forschungsvorhabens, aufgeteilt nach Arbeitspaketen, Meilensteinen und Abbruchzeitpunkte, kann durch **Abbildung 4** entnommen werden.

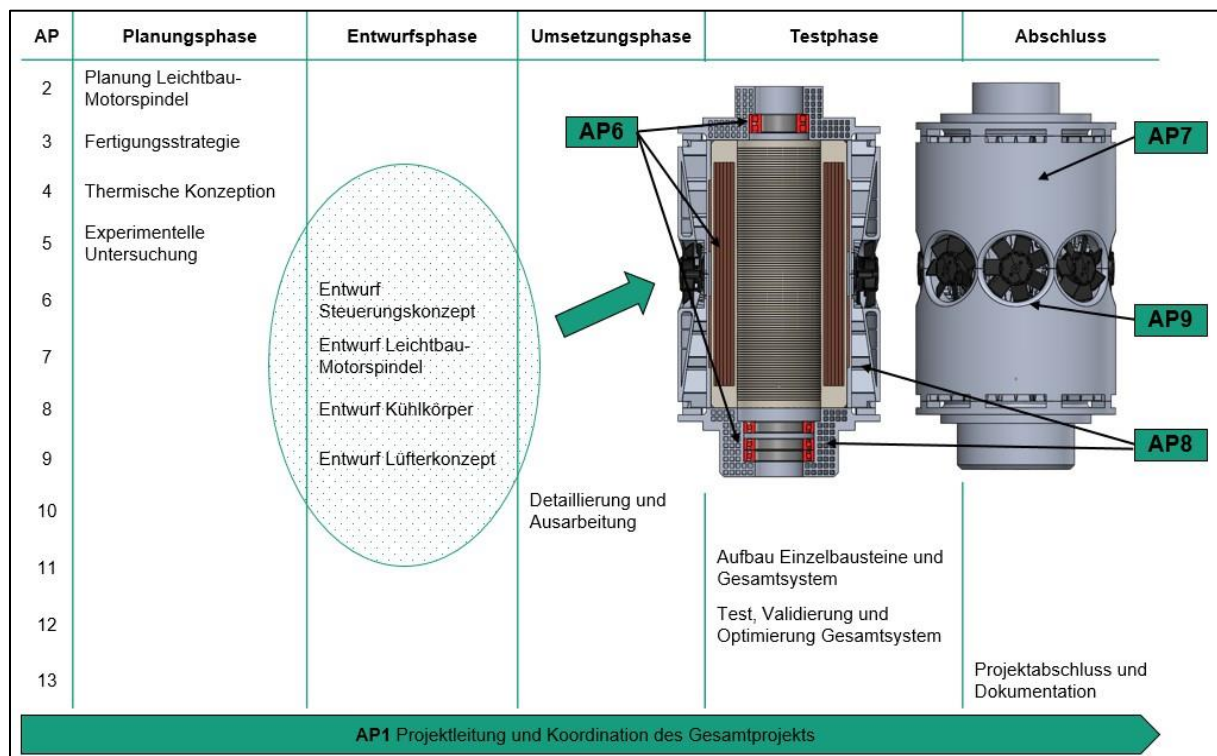


Abbildung 4: Darstellung der geplanten Tätigkeiten und Arbeitspaketen (AP)

Das Fraunhofer IPA übernimmt die Projektkoordination und Überwachung des gesamten Forschungsvorhabens. Weiter beschäftigt es sich schwerpunktmäßig mit der numerischen Simulation des Temperaturfeldes, der unterschiedlichen Konzepte der Kühlkörper und der Lüfter und realisiert die Konzeption dieser Komponenten und deren experimentelle Validierung. Darauf aufbauend fokussiert sich Roschiwal auf die Entwicklung und Konzeption des Spindelgehäuses. Dabei auftretende Fertigungs- und prozesstechnische Fragestellungen bezüglich der additiv herzustellenden Einzelkomponenten werden in Zusammenarbeit mit der Hochschule Aalen als assoziiertem Partner gelöst, der zudem die Herstellung der Komponenten durchführt. Die Zusammenführung des Gesamtkonzeptes der Leichtbau-Motorspindel sowie die Planung und Entwurfsausarbeitung des Gehäuses übernimmt

Reckerth und stellt dabei einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg des gesamten Forschungsvorhabens dar. **Abbildung 5** stellt den Arbeitsplan des Forschungsvorhabens dar.

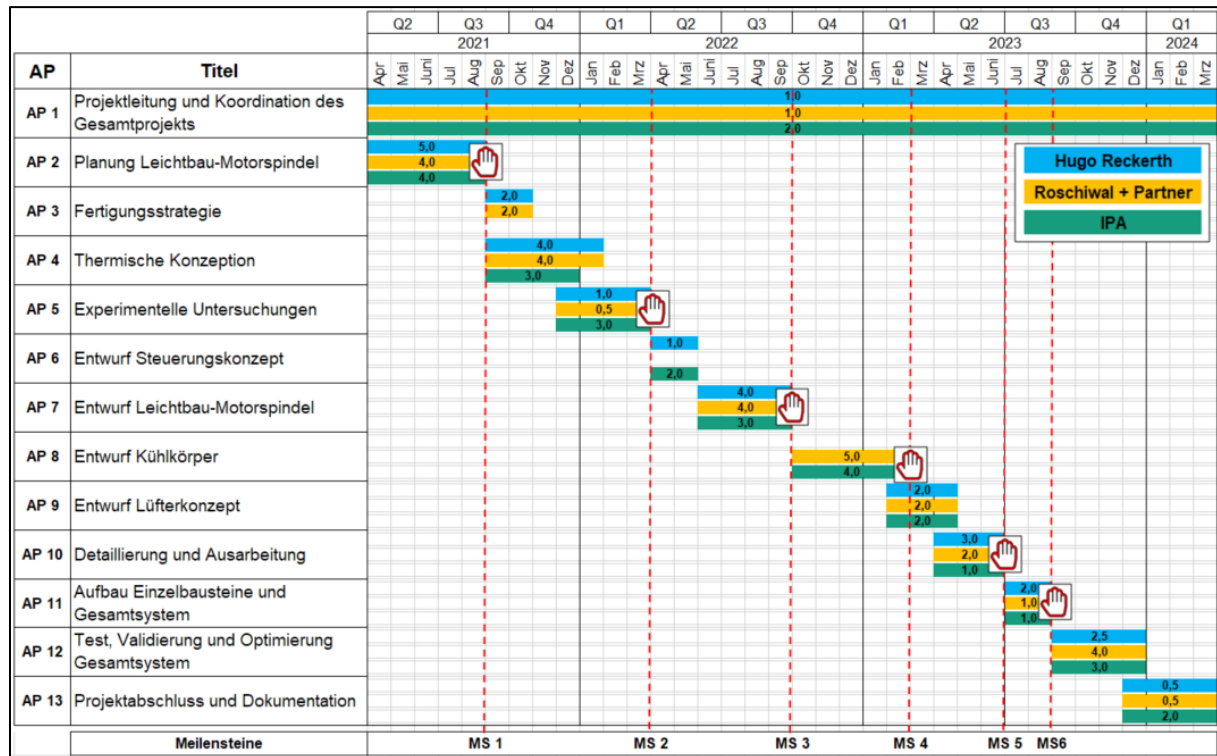


Abbildung 5: Arbeitsplan

Im weiteren Verlauf des Sachberichts werden zunächst das gesamte Arbeitspaket beschrieben, gefolgt von einer expliziten Darstellung der Tätigkeiten des Fraunhofer IPA. Es sei darauf hingewiesen, dass viele Inhalte in gemeinsamen Besprechungen und Vor-Ort-Terminen im Verbund besprochen, diskutiert und beschlossen wurden. Daher können an einigen Stellen Überschneidungen mit den Tätigkeiten anderer Partner auftreten. Sofern die Tätigkeiten gemeinsam erfolgten, wird keine explizite Benennung vorgenommen, während individuelle Beiträge entsprechend hervorgehoben werden.

3.1 AP1: Projektleitung und Koordination des Gesamtprojekts

Das **Fraunhofer IPA** hat die Koordination des Gesamtprojektes übernommen, um eine strukturierte Vorgehensweise sowie die Koordination und Abstimmung in den Entwicklungstätigkeiten der einzelnen Bausteine sicherzustellen. Regelmäßige Projektmeetings wurden geplant, organisiert und durchgeführt, um den Fortschritt der einzelnen Arbeitspunkte zu erfassen und potenzielle Schwierigkeiten sowie besondere Herausforderungen zu identifizieren. Dies ermöglichte die zeitnahe Ausarbeitung von Alternativlösungen.

Aufgrund der Corona-Pandemie fanden die Projektmeetings überwiegend im dreiwöchigen Rhythmus in Form von Online-Konferenzen statt. Diese Arbeitsweise wurde auch nach dem Ende der Pandemie beibehalten. Im Rahmen des gemeinsamen Kickoff-Meetings wurde die Vorgehensweise konkretisiert und die Planung erster Beschaffungen sowie Investitionen angestoßen. Gleichzeitig wurde eine umfassende Marktrecherche der elementaren Komponenten durchgeführt, wobei jeder Projektpartner seine spezifischen Kompetenzen in der jeweiligen Disziplin einbrachte.

Fraunhofer IPA:

Im ersten Schritt wurde eine umfassende Marktrecherche der frei auf dem Markt verfügbarer Axiallüfter im Bereich von 20 mm x 20 mm bis zu einem Durchmesser von 254 mm durchgeführt. **Abbildung 6** zeigt ein Teilausschnitt der Marktrecherche am Beispiel der Axiallüfter. Die Lüfter wurden katalogisiert nach Abmessungen, Volumenstrom, Nennspannung, Leistung, Drehzahl und maximal zulässigen Temperaturbereich. Die Recherche wurde anschließend auf Radiallüfter erweitert.

Darüber hinaus wurden weitere Marktrecherchen durchgeführt, um zusätzliche Gestaltungsansätze zu finden. Dabei wurde zu folgenden Technologien recherchiert: Wirbelrohr (Vortex Tube), Heatpipes, Vapor Chamber, kryogene Kühlung und Kühlung durch Luftbefeuchtung.

Axiallüfter		Ø127	127x127	135x135	140x140	Ø150		Ø172
Elm Papet								
Typ		Ø127	127x127	135x135		Ø150	Ø172	
Abmessung		mm	mm	mm		mm	mm	
Höhe		26	38	38		51	51	
Volumenstrom max.		m³/h	179	340	350	480	1.030	930
Spannung			12V-DC	12V-DC	12V-DC	12V-DC	24V-DC	48V-DC
Leistung		W	5,3	19	9,5	12	26	160
Drehzahl		U/min	2.800	4.900	2.800	3.000	4.000	7.500
Temperatur max.		°C	50	65	72	72	55	70
Nectus								
Typ								
Abmessung		mm						
Höhe		mm						
Volumenstrom max.		m³/h						
Spannung								
Leistung		W						
Drehzahl		U/min						
Temperatur max.		°C						
BEDEK								
Typ		M-						
Abmessung		mm						
Höhe		mm						
Volumenstrom max.		m³/h						
Spannung								
Leistung		W						
Drehzahl		U/min						
Temperatur max.		°C						
MBI								
Typ								
Abmessung		mm						
Höhe		mm						
Volumenstrom max.		m³/h						
Spannung								
Leistung		W						
Drehzahl		U/min						
Temperatur max.		°C						

Abbildung 6: Teilausschnitt der durchgeführten Marktrecherche verfügbarer Lüfter (Axial und Radial)

Darüber hinaus wurde die Planung von zwei unterschiedlichen Prüfständen vorangetrieben. Zum einen wurde ein Motorspindel-Prüfstand weitestgehend entworfen, der unterschiedlichen Bearbeitungsszenarien (z. B. konstante Drehzahl oder Drehmoment) abbilden kann, bei gleichzeitiger ganzheitlicher thermischer Überwachung des Demonstrators (**Abbildung 7**).

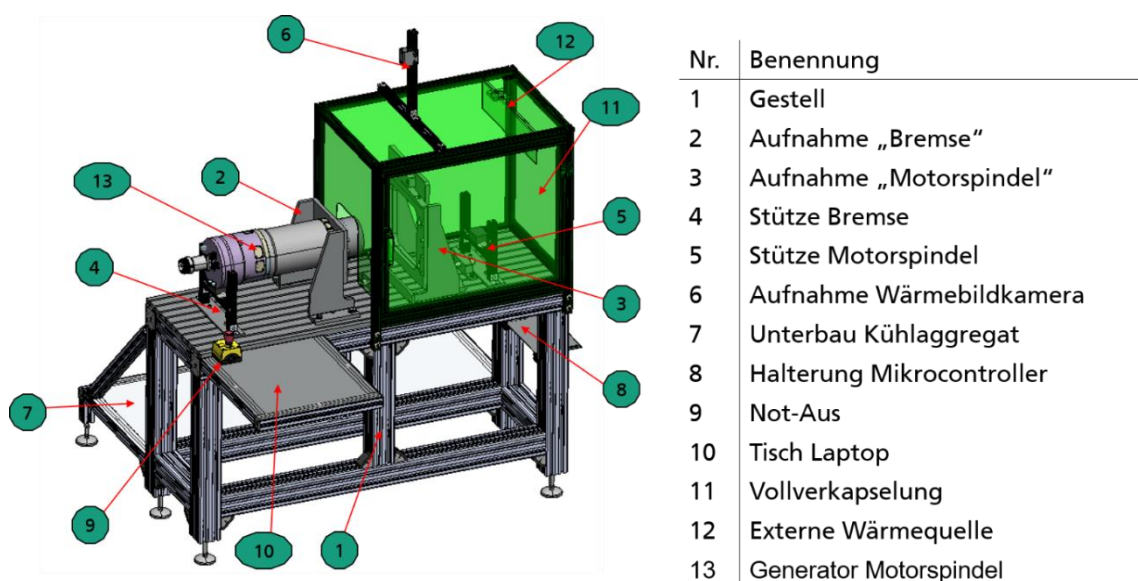


Abbildung 7: Motorspindel-Prüfstand und Aufzählung mit wesentlichen Bauteilen und Baugruppen

Herausfordernd war hierbei bei der Planung des Motorspindel-Prüfstand, dass infolge der Einstellbarkeit des Drehmoments und der vorherrschenden hohen Wärmeströme eine Sonderlösung entworfen werden musste. Zur Realisierung wurde in der präferierten Konzeptlösung eine zweite identische und baugleiche Motorspindel (Referenzmotorspindel) vorgesehen, die zeitweise als Generator arbeiten kann. Andere Lösungsmöglichkeiten wie beispielsweise Wirbelstrombremse schieden frühzeitig aus. Der Motorspindel-Prüfstand wurde im Konsortium hinsichtlich der hohen wirtschaftlichen Kosten wegen einer zweiten bauidentischen Motorspindel im Generatorbetrieb verworfen.

Zum anderen wurde ein Prüfstand zur umfangreichen thermischen und strömungstechnischen Untersuchung und Auswertung von Kühlkörpern entworfen (**Abbildung 8**). Durch eine externe Wärmequelle und ein vorgeschalteter drehzahlsteuerbarer Lüfter kann somit auch eine Bearbeitungsumgebung mit erhöhten Temperaturen sowie verschiedenen Luftströmungsgeschwindigkeiten untersucht werden.

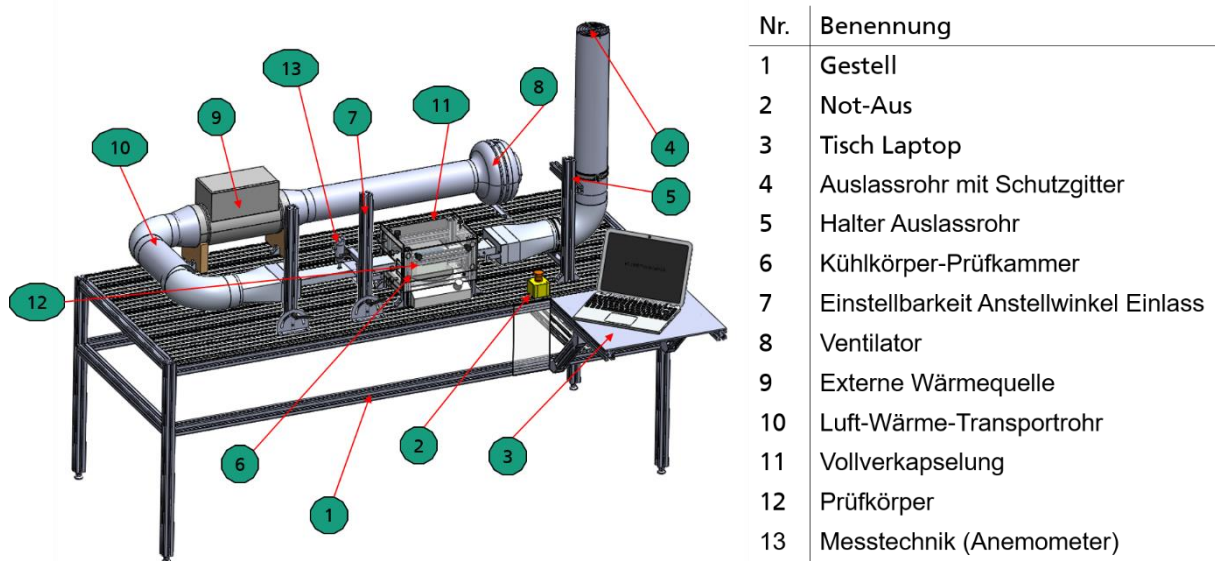


Abbildung 8: Kühlkörper-Prüfstand und Aufzählung mit wesentlichen Bauteilen und Baugruppen

Im weiteren Verlauf des Arbeitspaketes wurde die Auswertung der Patentrecherche über ähnliche Projektideen und -ansätze ausgeweitet (siehe Kapitel 2).

3.2 AP2: Planung Leichtbau-Motorspindel

Ziel war die Planung der Leichtbau-Motorspindel sowie die Erstellung der Anforderungsspezifikationen. Zur Feststellung der aktuellen Anforderungen und basierend auf der zuvor erarbeiteten Marktrecherche aus AP1 erstellte Reckerth ein Lasten- und Pflichtenheft, dass die technischen Merkmale (Leistungsbereich, kritische Temperatur der Motorwicklung und Lagerstellen, ...) sowie die relevanten Parameter dokumentierte. Auf Grundlage der Ergebnisse entwickelte Roschiwal ein Konzept für die Leichtbau-Motorspindel, wobei strukturmechanische, dynamische und thermische Anforderungen berücksichtigt wurden. Konventionelle Bauteile und Komponenten der Motorspindel sollten durch Werkstoffe mit hohem Leichtbaupotential und ausgezeichneten konvektiven Eigenschaften ersetzt werden. Das **Fraunhofer IPA** begleitete die Planungsphase durch gekoppelte thermo-mechanische und FEM-Simulationen, um die physikalischen Eigenschaften einer ausgewählten Motorspindel zu analysieren. Die Identifizierung eines idealen Temperaturprofils sowie die Ermittlung lokaler Temperaturspitzen in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens und des zulässigen Temperaturbereichs der Einzelkomponenten stellten wesentliche Zielgrößen dar. Zur frühzeitigen Validierung der numerischen Simulationen und zur Quantifizierung erforderlicher Randbedingungen in Relation zu unterschiedlichen Probenkörpern plante das **Fraunhofer IPA** in Zusammenarbeit mit Roschiwal erste experimentelle Untersuchungen, führte diese durch und dokumentierte sie entsprechend.

Mit Abschluss von **Arbeitspaket 2** wurde der **erste Meilenstein**, die Fertigstellung Anforderungsspezifikationen und Erstellung Lasten- und Pflichtenheft erreicht.

Fraunhofer IPA:

Ziel war die Planung der Leichtbau-Motorspindel sowie die Erstellung der Anforderungsspezifikationen. Zur Feststellung der aktuellen Anforderungen und basierend auf der zuvor erarbeiteten Marktrecherche aus dem ersten Arbeitspaket erstellte Reckerth ein Lasten- und Pflichtenheft, dass die technischen Merkmale (Leistungsbereich, kritische Temperatur der Motorwicklung und Lagerstellen, ...) sowie die relevanten Parameter dokumentierte.

Im ersten Arbeitsschritt wurde eine Referenzmotorspindel von der Fa. Reckerth (Typ: RF-HSK-B80 175/175x510 16/55) zur Erfassung des Istzustandes der bisherigen Wasserkühlung mit einer thermisch-stationären Simulation untersucht (siehe **Abbildung 9**). Gemäß Datenblatt ist mit einer zu kühlenden Verlustleistung des Motors von 4,2 kW, bei 12 l/min bis 15 l/min, zu rechnen, das ca. 8 % der Anschlussleistung im S1 Betriebszustand entspricht.

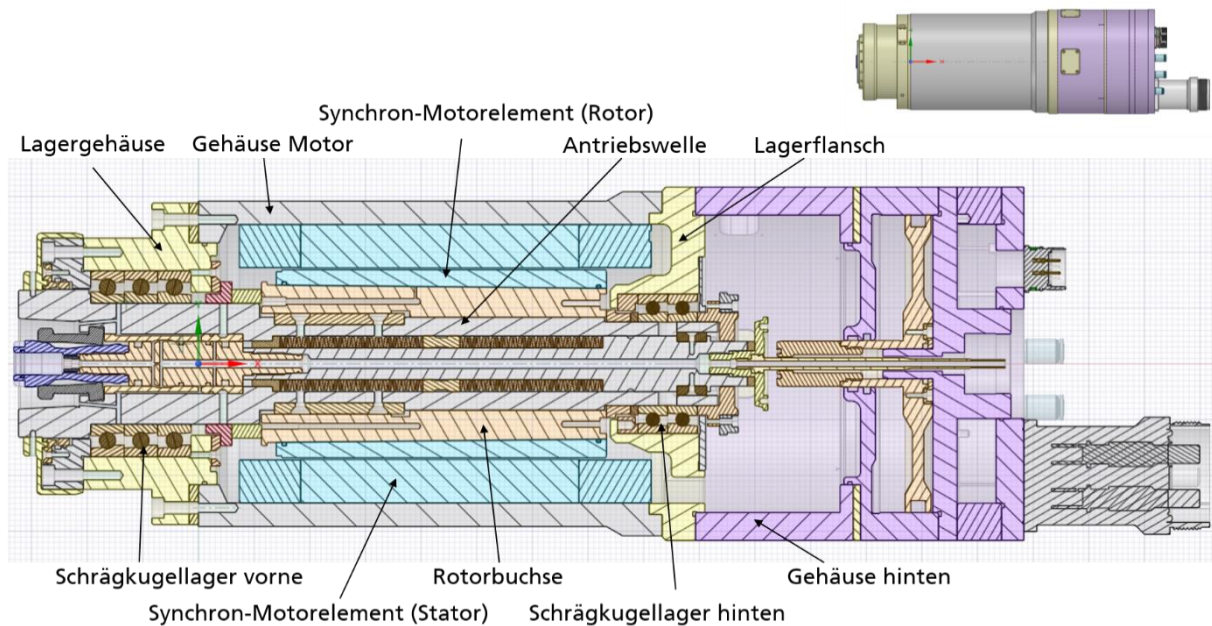


Abbildung 9: Schnittansicht Referenzmotorspindel RF-HSK-B80 175/175x510 16/55

Die Randbedingungen wurden auf Grundlage gemäß VDI-Wärmeatlas⁶ und in Zusammenarbeit mit der Fa. Reckerth ermittelt. Die Untersuchung der Referenzspindel zeigten, dass der signifikante Teil der dissipierten Wärme über Konvektion der inneren Kühlwasserkanäle abgeführt werden. Die Simulationen stellen einen ersten Indikator dar, in welcher Höhe die Wärmeströme entsprechend abgebaut werden und wo Temperaturspitzen zu erwarten sind.

In darauffolgenden Simulationen wurde die Referenzmotorspindel modifiziert, sodass eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Luft und Wasser erfolgen kann. Die Identifizierung

⁶ Stephan, Peter, et al., eds. *VDI-Wärmeatlas: Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*. Springer-Verlag, 2019.

eines idealen Temperaturprofils und die Ermittlung lokaler Temperaturspitzen in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens (z. B. Schleifoberfläche) und des zulässigen Temperaturbereiches der Einzelkomponenten stellten dabei wesentliche Zielgrößen dar. Aufbauend zu der Untersuchung des Temperaturverhaltens der Wasserkühlung der ausgewählten Motorspindel wurde nachfolgend eine Luftkühlung untersucht. Jedoch wurde anstelle des Helix-Kühlkanals eine Luftkanalführung über die gesamte Motorspindel implementiert (siehe **Abbildung 10**). Das Modell wurde als Achsensymmetriemodell in 2d aufgebaut. Als einstellbare Parameter für die thermischen Simulationen wurde die Umgebungstemperatur von 20 °C bis 40 °C (Sommer- und Winterbedingungen) und eine Strömungsgeschwindigkeit von 0 m/s bis 100 m/s vorgegeben.

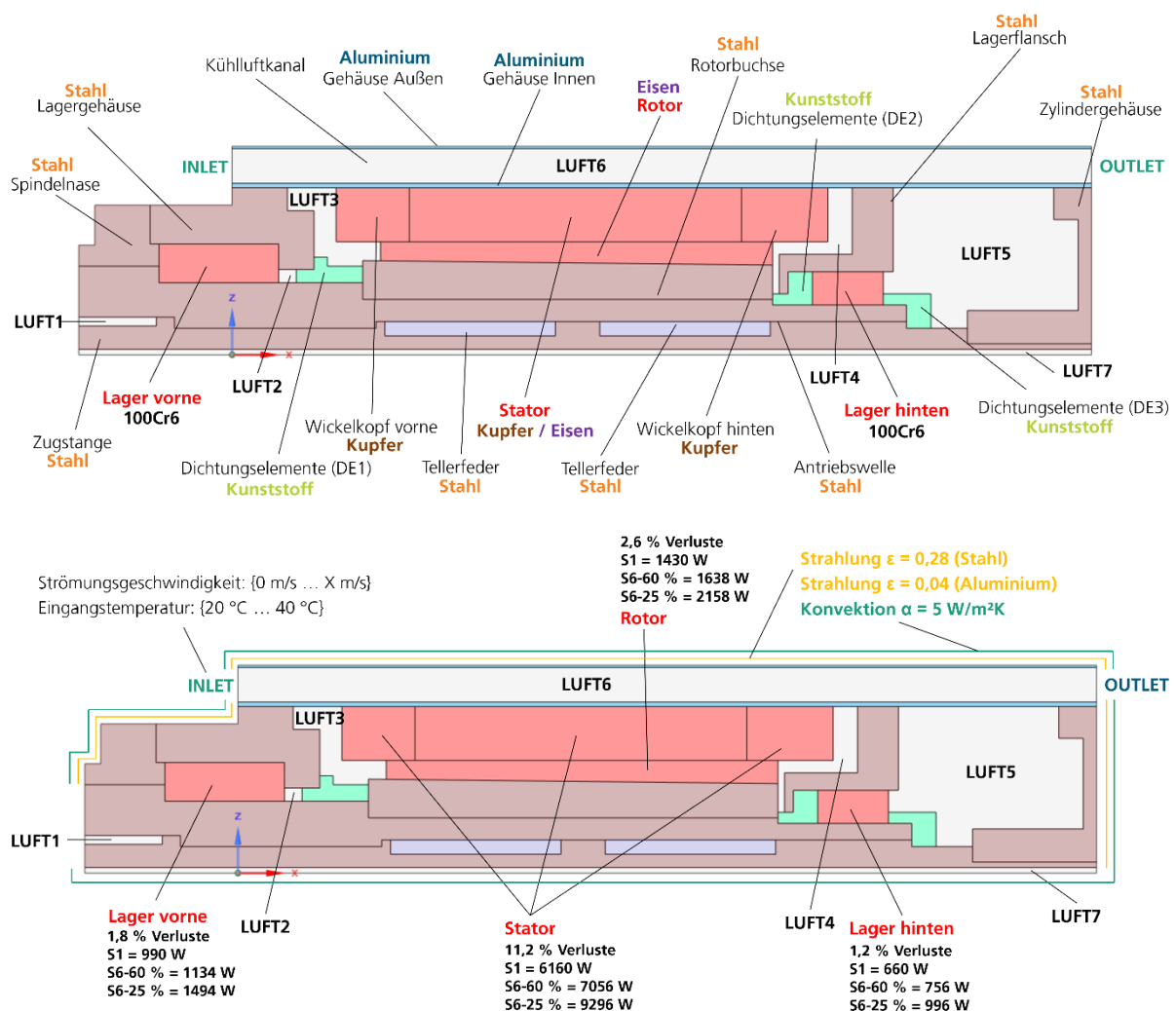


Abbildung 10: Überblick des modifizierten Simulationsmodell zur Untersuchung einer luftgekühlten Motorspindel. Darstellung der verwendeten Materialien (oben) und Darstellung der Randbedingungen und Wärmeströme (unten).

Das Ziel der Untersuchungen war es auf Grundlage der parametrisierten Strömungsgeschwindigkeit am Einlass des Luftkühlkanals den erforderlichen Volumenstrom zur Temperierung der Referenzspindel abzuschätzen. Mit Erhalt des erforderlichen Volumenstroms kann eine Ableitung der erforderlichen Anzahl der Lüfter sowie deren benötigter Anschlussleistung erfolgen.

Zur Vergleichbarkeit wurden die Simulationen sowohl mit einem theoretischen idealen Kontakt, d.h. die gesamte wärmeübertragende Oberfläche befinden sich im direkten Kontakt, als auch mit einem realen Kontakt, der durch die Fertigungsverfahren und der zu erwarteten Oberflächenrauigkeiten resultiert. Zur Einbindung der fertigungsbedingten Kontaktzonen wurde sich an entsprechender Literatur orientiert. **Abbildung 11** stellt eine Werkstoffübersicht der Motorspindel sowie die resultierende effektive Rauigkeitswerte der Werkstoffkombinationen zur späteren Implementierung in das Simulationsmodell dar.

Material	Dichte (kg/m³)	Wärmekapazität (J/kgK)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)
Aluminium	2.700	871	202
Stahl	7.900	509	16
Eisen	7.850	448	57
Kupfer	8.940	385	393
Kupfer40 % Eisen60 %	8.287	423	192
Kunststoff (PE)	950	1,9	0,42
100Cr6	7.800	460	33

Höhere Rauigkeitswerte → weniger Wärme kann über Kontaktflächen abgegeben werden

Berechnung: $\frac{5}{4} \cdot \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$

Madhusudana, Chakravarti V.: *Thermal Contact Conductance*, 2. Aufl. Cham: Springer Verlag, 2014. - ISBN 978-3-319-01276-6

Materialkombinationen	Effektive Rauigkeit / (µm)
Stahl / Stahl	106
Stahl / Aluminium	75
Stahl / Eisen	754
Stahl / Kupfer	75
Aluminium / Aluminium	3
Aluminium / Eisen	750
Aluminium / Kupfer	3
Eisen / Kupfer	750

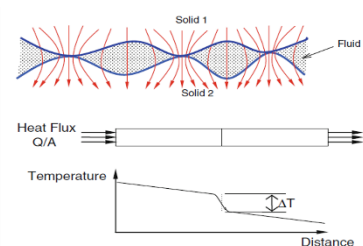


Abbildung 11: Übersicht der Werkstoffe und resultierende effektive Rauigkeitswerte der Werkstoffkombinationen

Weiterhin wurde anstelle einer stationär mechanischen Temperaturberechnung, in der die wärmeübertragende Konvektion als Randbedingung vorgegeben wird, eine Temperaturfeldanalyse mittels Strömungssimulation durch ANSYS Fluent durchgeführt. Als Ergebnis der Strömungssimulation stellt sich ein lokaler Wärmeübergangskoeffizient ein, der über

die Kühl-Helix-Oberfläche an Wert verliert. Grund hierfür ist die zum Auslass des Helix-Kühlkanals aufgenommene Wandtemperatur über die gesamte Kühlstrecke. Die Randbedingungen wurden auf Grundlage vorliegender Literatur ermittelt. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Randbedingungen wird nachfolgend aufgezählt

Randbedingungen:

- k- ω -SST Modell
- Stationäre Berechnung
- Eingeschaltete Energiegleichung
- Boundary Layer mit $y^+ < 1$
- Kompressibilität Luft
- Temperatur Luft am Einlass $T_E = 20\text{ °C}$ (und 40 °C)
- Strömungsgeschwindigkeit $v_E = \text{konstant} = \{0, \dots, 50\text{ m/s}\}$
- Rotationssymmetrie mit 1/16-Teilmodell
- Konstante Wärmeverluste abgeleitet vom Betriebsmodus S6 und Literatur
- Auslass der Kühlluft mit Umgebungsdruck
- Temperatur Kühlleitung Eingang $T = 22\text{ °C}$ (zweites Modell mit $T = 40\text{ °C}$)
- Konstante freie Konvektion der außenliegenden Oberflächen $\alpha = 5\text{ W/m}^2\text{K}$
- Strahlung zwischen Oberfläche zu Umgebung durch Stahl $\epsilon = 0,28$
- Strahlung zwischen Oberfläche zu Oberfläche durch Aluminium $\epsilon = 0,04$
- Durchfluss der Kühlwasserleitung $\dot{V} = 12\text{ Liter/Minute}$

Zur Berechnung der Wärmestromdichte der Wärmequellen wurde die Verlustleistung von 16,5 % der Motorspindel mit Synchronmotor bei Maximalbelastung herangezogen. Die Verlustleistung lässt sich wiederum auf verschiedene Komponenten in der Motorspindel aufteilen. So entsprechen 11,2 % den Wicklungen und dem Stator, 2,6 % dem Rotor und 2,7 % den Lagerungen. Mit dieser Erkenntnis und den Betriebspunkten der auszuwertenden Referenzspindel, ist die Bestimmung der Wärmestromdichten möglich. Aus dem Datenblatt der Motorspindel wird der Betriebspunkt mit der maximalen Belastung ausgewählt, damit sichergestellt werden kann, dass die Motorspindel in allen Betriebspunkten funktionsfähig bleibt. Die maximale Eingangsleistung der Motorspindel im Betriebsmodus S6 „Stator: Wasser, Rotor: ungekühlt 25 %, Spieldauer 120 s“ beträgt 83 kW. **Abbildung 12** stellt eine Übersicht in Abhängigkeit der Betriebspunkte und Wärmequellen sowie der daraus folgenden Höhe der Wärmeströme dar.

Nr.	Verlustart	Synchron	Asynchron	S1 / (W)	S6-60% / (W)	S6-25% / (W)	Motor-Datenblatt / (W)
1	Σ Statorverluste	11,20%	11,20%	6160	7056	9296	2751
1.1	Kupferverluste	2,90%	2,90%	1595	1827	2407	712
1.2	Eisenverluste	4,10%	4,10%	2255	2583	3403	1007
1.3	Zusatzverluste	4,20%	4,20%	2310	2646	3486	1032
2	Σ Rotorverluste	2,60%	5,40%	1430	1638	2158	639
2.1	Kupferverluste	0,00%	2,80%	0	0	0	0
2.2	Eisenverluste	0,10%	0,10%	55	63	83	25
2.3	Zusatzverluste	2,50%	2,50%	1375	1575	2075	614
3	Σ Lagerverluste	3,00%	3,00%	1650	1890	2490	737
3.1	Lager vorne	1,80%	1,80%	990	1134	1494	442
3.2	Lager hinten	1,20%	1,20%	660	756	996	295
4	Σ sonstige Verluste	0,30%	0,30%	165	189	249	74
4.1	Luftreibungsverluste	0,30%	0,30%	165	189	249	74
Werte für Synchron-Maschine:							
SUMME		17,1 %	19,9 %	9405 W	10773 W	14193 W	4200 W

Schulz, H.; Gebert, K.: Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnelldrehenden Motorspindeln, Darmstadt, Diss., 1997. - ISBN 978-3-8265-2881-1

Abbildung 12: Überblick Verluste in Abhängigkeit der Verlustquelle

Es zeigt sich, dass ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 50 m/s das Haupt- und Nebelager das geforderte Temperaturniveau von 90 °C unterschreitet. Mit einer zusätzlichen Steigung der Strömungsgeschwindigkeit um ca. 10 m/s unterschreiten Stator und Rotor ebenfalls die geforderte Temperatur von 90 °C.

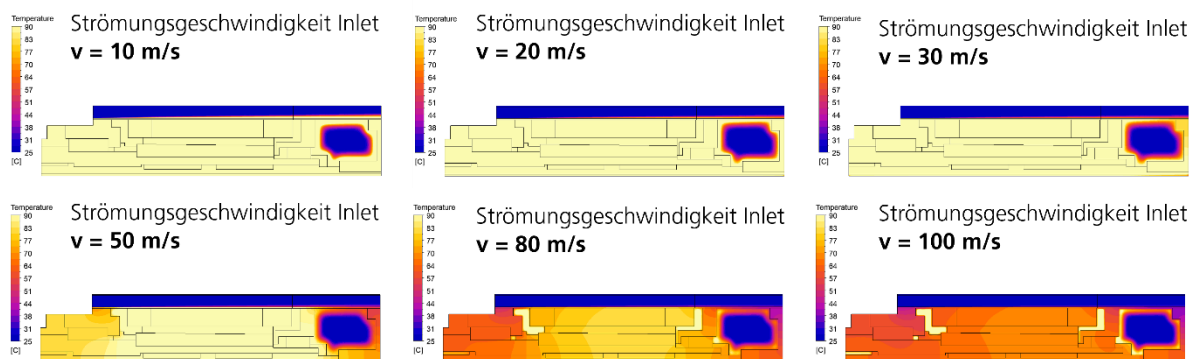


Abbildung 13: Temperaturfeld in Abhängigkeit unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten am Einlass bei 20 °C Einlasstemperatur

Zur besseren Übersicht wurde die Maximaltemperatur für relevanten Komponenten und definierte Strömungsgeschwindigkeit in ein Diagramm (siehe **Abbildung 14**) überführt. Ergänzend dazu wurde die berechnete Temperatur pro Komponente auf eine Temperatur von 90 °C normiert. Mit den thermischen Simulationen der Motorspindel des Typs „RF-

HSK-B80 175/175x510 16/55" konnte gezeigt werden, dass ab einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 60 m/s im Betriebsmodus S1 die Motorspindel unter der Temperatur-Obergrenze von 90 °C temperiert werden kann.

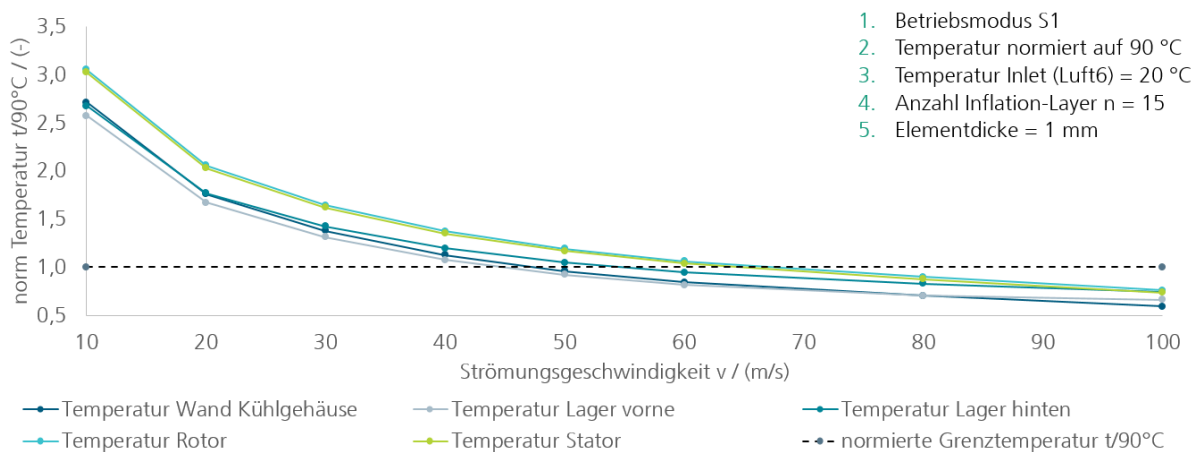


Abbildung 14: normierte (gemittelte) Temperaturen im S1-Modus in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit

Die thermischen Untersuchungen belegen, dass die Motorspindel mit Luftkühlung im praktischen Einsatz unter der Temperatur-Obergrenze von 90 °C temperiert werden kann. Für eine entsprechende Temperierung der Motorspindel im S1-Betriebsmodus wird eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 60 m/s benötigt. Eine solche Strömungsgeschwindigkeit kann durch eine Verringerung des Strömungsquerschnittes erreicht werden. Exemplarisch zeigt das obenstehende Beispiel des Axial-Lüfters des Typs 422-JH, dass der Durchmesser um den Faktor 2,6 auf 15 mm reduziert werden muss. Im späteren Verlauf des Verbundprojektes werden filigrane Kühlelemente mit geringen Kühlluftkanälen vorliegen, sodass höhere Strömungsgeschwindigkeiten erwartet werden können. Die Simulationen wurden im Ausgangszustand mit einer wärmeübertragenden Kühlgehäuseoberfläche von 0,139 m² durchgeführt, d.h., dass die Vergrößerung der Oberfläche des Kühlgehäuses durch konstruktive Maßnahmen noch nicht berücksichtigt wurde. Auf der Grundlage möglicher Lüftervarianten wurde der realisierbare Wärmeübergangskoeffizient abgeschätzt. Darauf aufbauend kann die erforderliche wärmeübertragende Mindestoberfläche des Kühlgehäuses abgeleitet werden. Im jetzigen Stadium ist noch nicht bekannt, welcher Lüfter später zum Einsatz kommt. Für eine spätere Vergleichbarkeit wird ein Mittelwert

des Wärmeübergangskoeffizientes von $32 \text{ W/m}^2\text{K}$ über alle Lüftervarianten angenommen. Auf Basis der Maximaltemperatur von 90°C , einer Umgebungstemperatur von 20°C und den herrschenden Wärmeströmen wurde mittels vorliegender Berechnungsvorschrift die erforderliche Oberfläche ermittelt

Abbildung 15 stellt das Ergebnis der erforderlichen Kühloberfläche in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizientes dar. Die Kühloberfläche wurde dabei auf die Ausgangsoberfläche der Motorspindel von $0,139 \text{ m}^2$ bezogen.

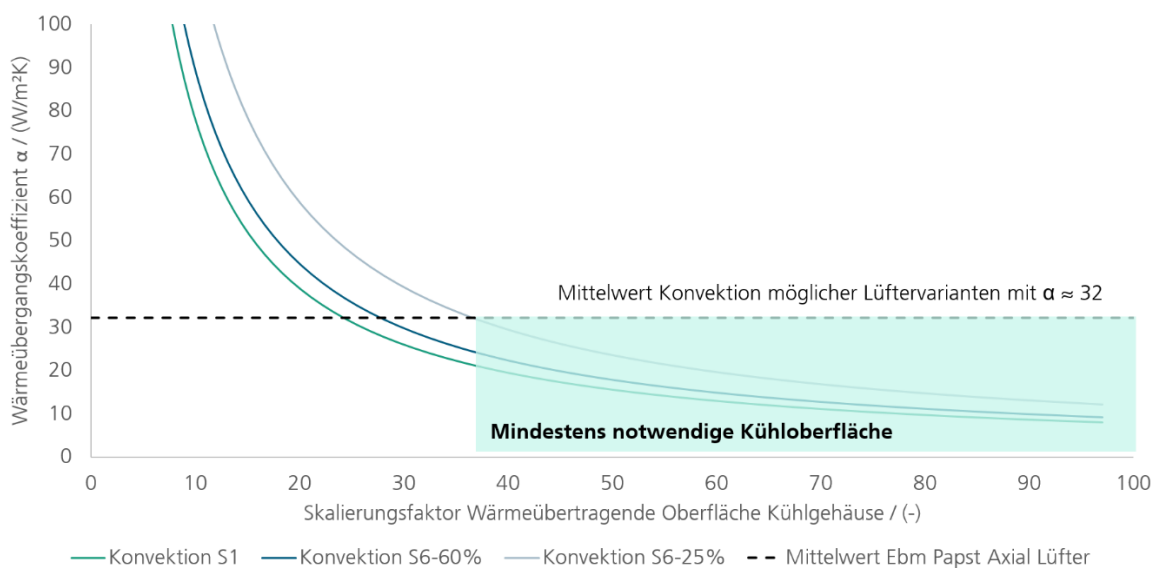


Abbildung 15: Wärmeübergangskoeffizient in Variation der normierten Oberfläche des Kühlgehäuses

Die Ergebnisse zeigten, dass mindestens eine ca. 25-fache Vergrößerung der Kühloberfläche zur Einhaltung des Temperaturniveaus beim S1-Betriebsmodus erforderlich ist. Als Grenzwert wurde der zuvor bestimmte mittlere Wärmeübergangskoeffizient ($\alpha \approx 32 \text{ W/m}^2\text{K}$) der Lüftervarianten herangezogen. Die erforderliche Oberfläche steigt bei S6-25% Betriebsmodus auf ca. das 35-fache Niveau im Vergleich zur Ausgangsoberfläche an. Mit Verrechnung der zur Verfügung gestellten Stirnfläche des Kühlluftkanals von $0,098 \text{ m}^2$ stellt sich somit ein erforderlicher Volumenstrom von ca. $700 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. ca. $1050 \text{ m}^3/\text{h}$ ein.

Die Simulationen stellten eine gute Referenz dar, in welcher Höhe die Wärmeströme entsprechend abgebaut werden. Jedoch muss angemerkt werden, dass das Simulationsmodell immer eine Vereinfachung der reellen Motorspindel darstellt. Beispielsweise wurden die Verlustwärme der Haupt- und Nebenlager nur als eine konstante Wärmequelle, die in allen Raumrichtung identisch die Wärme abgibt in das Modell eingebaut. Das stellt aber eine starke Vereinfachung der Realität wieder. Durch den Aufbau, mit einem Innen- und Außenring und den Kugeln des Lagers dazwischen, würde sich eine präzisere Modellierung anders gestalten. Einerseits müsste ein zusätzlicher Luftraum modelliert werden und andererseits ist der Wärmevektor anders zu definieren.

3.3 AP4: Thermische Konzeption

Ziel war die Ableitung von Integrationsstrategien und Kühlzonen des LB-Motorspindelgehäuses. Die gewonnenen Ergebnisse aus dem zweiten Arbeitspakets nutzte Roschiwal zur Entwicklung eines optimalen Energiemanagements und Wärmekonzeptes zur Steuerung der Wärmeströme sowie zur Reduktion lokaler Temperaturspitzen an kritischen Bauteilen und Sensorik-Komponenten. Um lokale Überhitzungen durch kurzzeitig auftretende Motor-Lastspitzen infolge von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen zu verhindern, sollte die resultierende Prozesswärme durch unterschiedliche Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit in Hybrid-Bauweise und durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Variation der Materialstärke) schnell zu Pufferzonen transportiert und abgeleitet werden. Als Wärmepuffer konnten Materialanhäufungen sowohl in Form von Wandstärken an Funktionsgeometrien als auch von Kühlrippen eingesetzt werden.

Die Aufteilung der Motorspindel in thermische Zonen an der Spindelnase und dem Flansch mit Lager sowie Sensorik stellte dabei einen wesentlichen Arbeitspunkt dar, den das **Fraunhofer IPA** durch begleitende numerische Simulationen in Zusammenarbeit mit Reckerth federführend entwickelte. Die Festlegung einer Strategie für einzelne Kühlzonen sowie deren Integration in das bestehende Motorspindelkonzept waren abschließende Arbeitspunkte des Arbeitspakets.

Fraunhofer IPA:

Das vorherige Arbeitspaket belegte, dass die Motorspindel als Luftkühlung im praktischen Einsatz unter der Temperatur-Obergrenze betrieben werden kann. Jedoch erfordert dies eine deutlich erhöhte Strömungsgeschwindigkeit im Luftkanal und eine Steigung der wärmeübertragenden Kühlflächen. Auf Grundlage möglicher Lüftervarianten wurde durch Zuhilfenahme der Literatur ein Wärmeübergangskoeffizient abgeschätzt, sodass der erforderliche Skalierungsfaktor (Vergrößerungsfaktor der Gehäuseoberfläche auf Grundlage der Ausgangsoberfläche) des Kühlgehäuses ermittelt werden konnte. **Abbildung 16** stellt das Ergebnis der erforderlichen Kühloberfläche in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizientes und Betriebsart dar. Die Kühloberfläche wurde dabei auf die Ausgangsoberfläche des Motorspindel normiert.

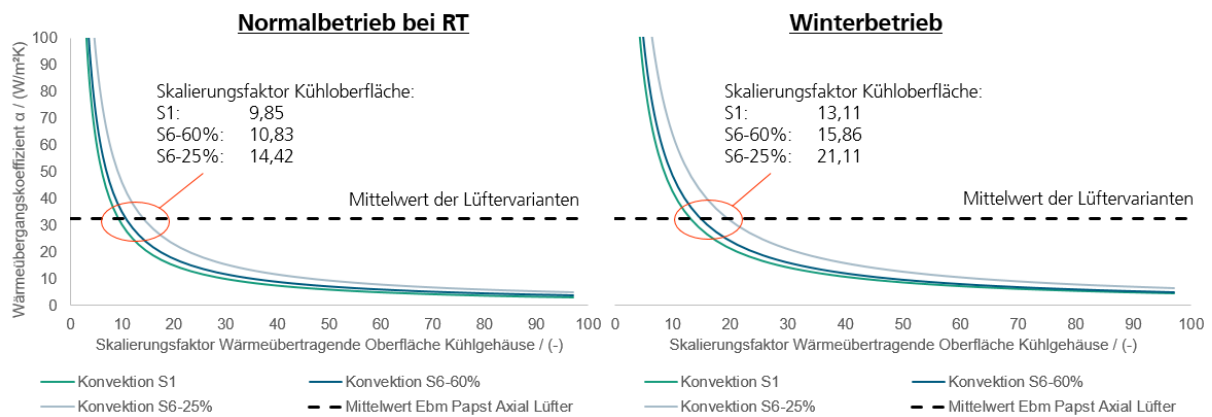


Abbildung 16: Wärmeübergangskoeffizient in Variation der normierten Oberfläche des Kühlgehäuses

Zur Einschätzung der technischen Realisierbarkeit der benötigten Kühlflächen wurden konstruktive Lösungsansätze entworfen und im gemeinsamen Projektmeetings bewertet. Dabei hat sich eine Verlängerung des Kühlgehäuses bzw. der Kühlelemente in axialer Richtung über die gesamte Motorspindellänge als vielversprechendste Lösungsstrategie herauskristallisiert. **Abbildung 17** stellt exemplarisch eine mögliche technischer Lösungsansatz des Kühlgehäuses dar.

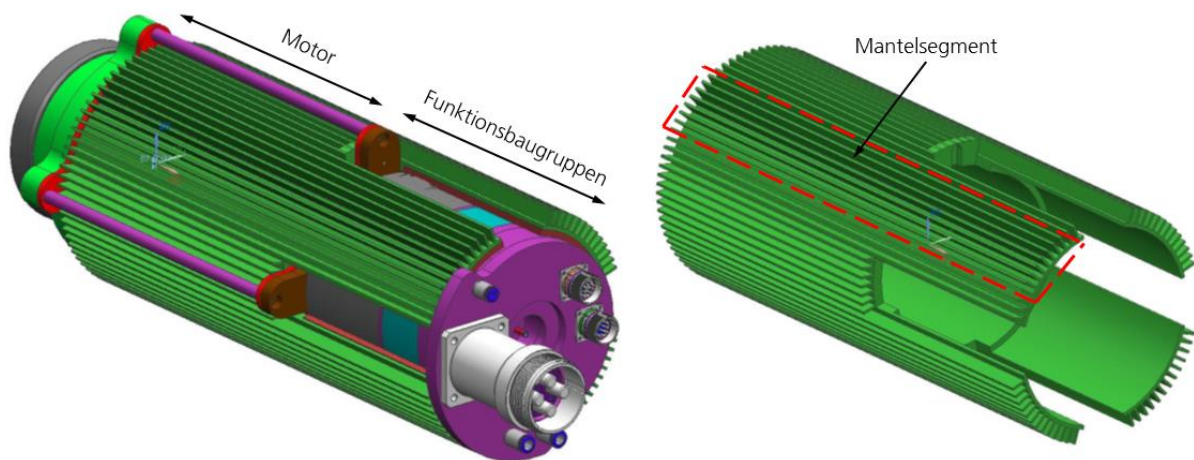


Abbildung 17: Vergrößerung des gesamten Kühlgehäuses über die vollständige Motorspindellänge

Zur Dimensionierung der Kühlstruktur (Länge, Breite, Höhe) wurde der erweiterte Kühlbereich entsprechend seinen Aufgaben unterteilt. Die Hauptverlustquellen des Stators aus und Luftreibungsverluste stellen dabei den Hauptfokus dar. **Abbildung 18** stellt eine grundsätzliche Übersicht der Aufgabenverteilung des Motorspindel-Gehäuses auf Grundlage der Wärmeverluste des Stators dar.

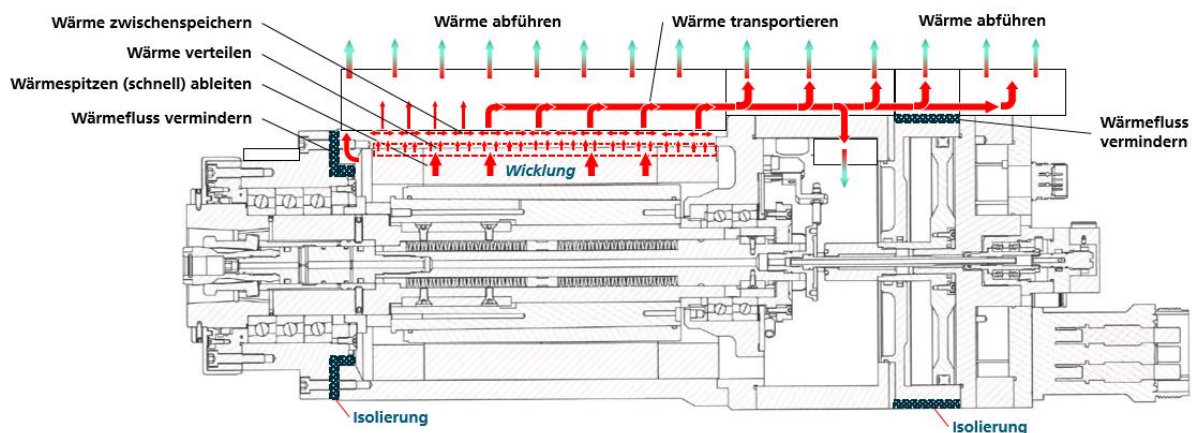


Abbildung 18: Aufgabenverteilung des Motorspindel-Gehäuses

Einerseits muss gewährleistet werden, dass die Vektorrichtung des Wärmeflusses im laufenden Produktionsbetrieb sich nicht umkehren. Infolge des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik zeigt der Gradient in Richtung eines Temperaturgefälles, d.h., es muss von den Lüftern erzeugte Luftbewegung schnell im hinteren Bereich der Motorspindel transportiert und an die Umgebung abgeführt werden. Andererseits muss auch bei einer kurzzeitigen Lastspitze eine Überhitzung des Stators verhindert werden. Das soll beispielsweise durch Heatpipes, und/oder andere Werkstoffkombinationen (z. B. Kupfer mit höherer Wärmeleitfähigkeit, etc.) realisiert werden. Es ist davon auszugehen, dass sich die beiden Wickelköpfe stärker aufheizen als das Blechpaket des Stators. Daraus ableitend muss am Stator eine ungleichmäßige Wärmestrommenge abgeführt werden.

Um lokale Überhitzungen durch kurzfristig auftretende Motor-Lastspitzen zu verhindern, wurden verschiedene Konzepte entwickelt und im Verbund bewertet. Im Konzept V3b (siehe **Abbildung 19**) wurde die Kühlfläche deutlich vergrößert. Bei gleichbleibendem Bauraum wurde der hintere Teil der Motorspindel im Durchmesser so weit reduziert, dass der Kühlmantel örtlich weiter nach hinten gezogen werden konnte. Um zu verhindern, dass vom nach hinten gezogenen Kühlmantel Wärme in den Sensorraum abgegeben wird, wurden an dieser Stelle Isolatoren eingebracht. Zur Erhöhung der Kühlleistung konnte ein großer Ventilator installiert werden, wobei auch mehrere kleine Ventilatoren möglich waren. Um die Kühlluft gezielt von hinten nach vorne zu leiten, wurde um den Kühlkörper ein dünner Mantel gelegt, dessen Länge und Form noch optimiert werden mussten.

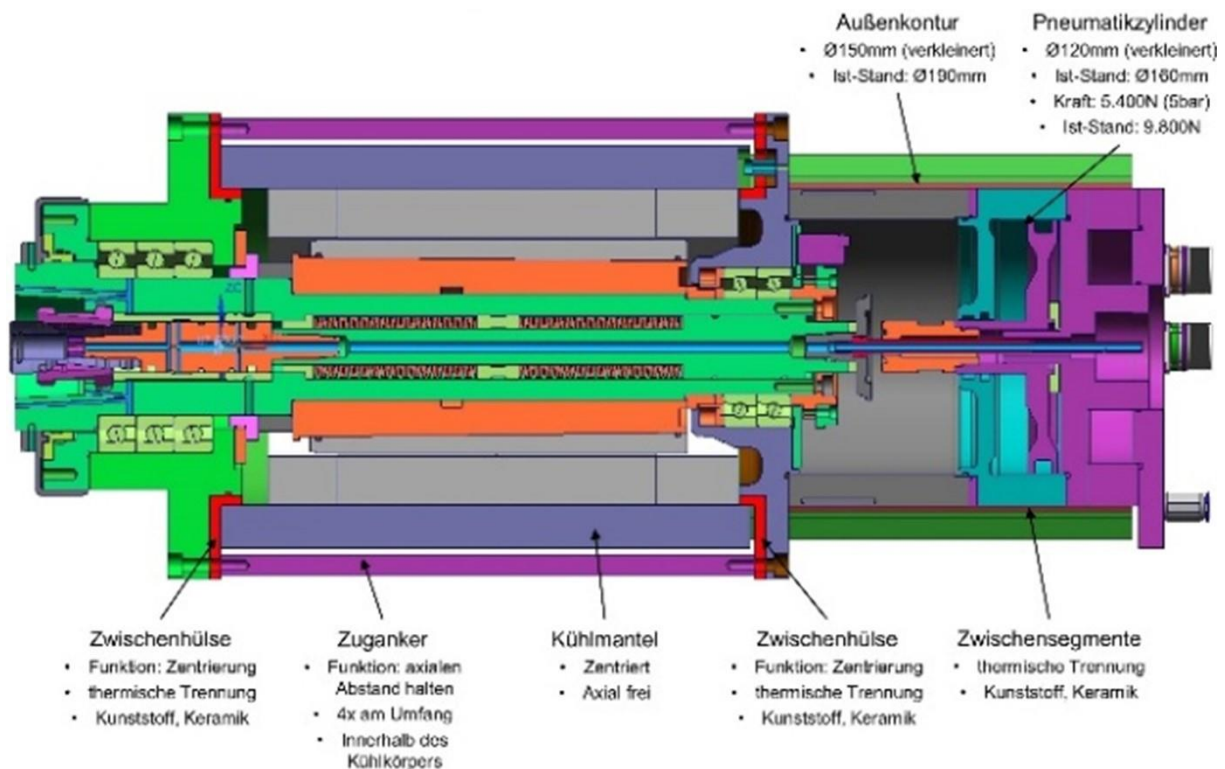


Abbildung 19: Entwurf V3b: Kühlmantel lang

Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der Wärmeabfuhr war die Adaption des Hochleistungskühlers, der aus der Computerbranche stammt (siehe **Abbildung 20**). Hierbei wurde die Wärme über die Oberfläche von vielen übereinander geschichteten dünnen Blechen mit einer Dicke von 0,1 mm bis 0,2 mm abtransportiert. Diese Bleche konnten aus Aluminium oder einem anderen Werkstoff hergestellt werden. An diesem Konzept konnten Lüfter angebracht werden, die bei der derzeitigen Geometrie nur Abmessungen von 25 mm x 25 mm x 8 mm haben konnten.

Der Ansatz des Hochleistungskühlers wurde im Konzept V2c weiterbearbeitet, wobei die dünnen Bleche mit einer Dicke von 0,2 mm radial nach außen standen, um die Wärme besser abtransportieren zu können. Optional mögliche Lüfter würden die erhitzte Luft ebenfalls radial nach außen blasen. Um die Oberfläche weiter zu vergrößern, könnten die Bleche nur 0,1 mm dick sein, mit einer leichten Umkantung, und gegensinnig eingebaut werden.

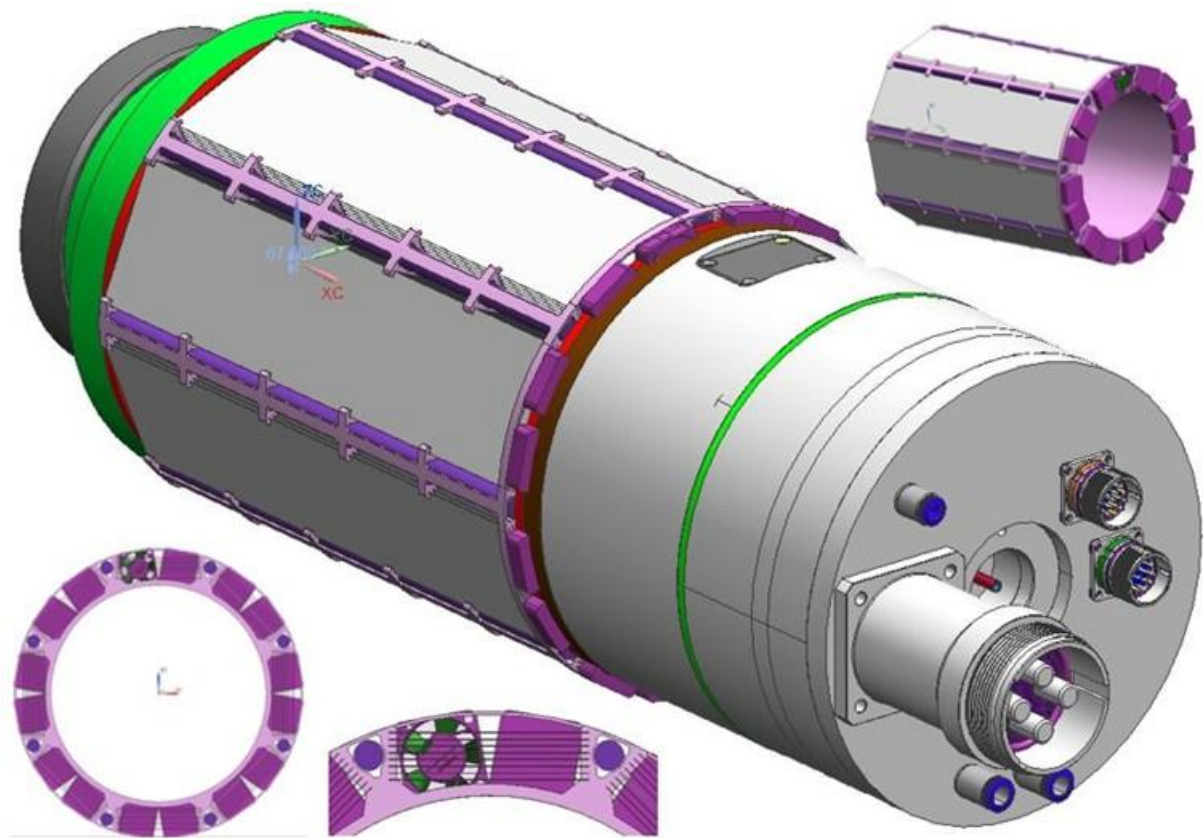


Abbildung 20: Entwurf V3b: Kühlmantel lang

Um auftretende Wärmespitzen von den kritischen Bauteilen abzuführen, wurden in Konzept V3e Rohre eingelegt, die im hinteren Bereich durch zwei Verteilerplatten (warm und kalt) verbunden waren. Diese Rohre konnten grundsätzlich mit jedem Kühlmedium (flüssig oder gasförmig) durchströmt werden, z. B. mit kalter Druckluft. Der Medienstrom sollte durch eine Temperaturregelung nur im Bedarfsfall aktiviert werden und dezentral abgekühlt werden.

Im Konzept V3f wurden die Rohre aus dem Konzept V3e durch in den Kühlmantel integrierte Kanäle ersetzt, was durch die angestrebte Herstellung im 3D-Druck-Verfahren möglich war (siehe **Abbildung 21**). Der maximal realisierbare Kanal-Durchmesser war hierbei jedoch auf ca. 4 mm begrenzt. Der Verteilerring für das Medium war einteilig und wurde ebenfalls für die Herstellung mittels Metall-3D-Druck-Verfahren optimiert und hinten auf den Kühlmantel adaptiert. Das Konzept des Hochleistungskühlers wurde bereits in Bezug auf einen Kühlkörper aus vielen dünnen Blechen adaptiert. Die Wärmeverteilung zur Kühlung des Computer-Prozessors auf die dünnen Bleche erfolgte mit Heatpipes, die

aus auf beiden Seiten verschlossenen Kupferrohren mit einer Innenstruktur bestehen, die teilweise mit einem Arbeitsfluid gefüllt sind. Das Arbeitsfluid verdampfte und kondensierte, wodurch ein kontinuierlicher Kreislauf entstand. Heatpipes sind erprobte Komponenten, die in verschiedenen Abmessungen und preiswert auf dem freien Markt verfügbar sind. Sie erschienen vielversprechend, waren gut zu integrieren und wurden deshalb in die experimentellen Versuchsreihen eingebunden.

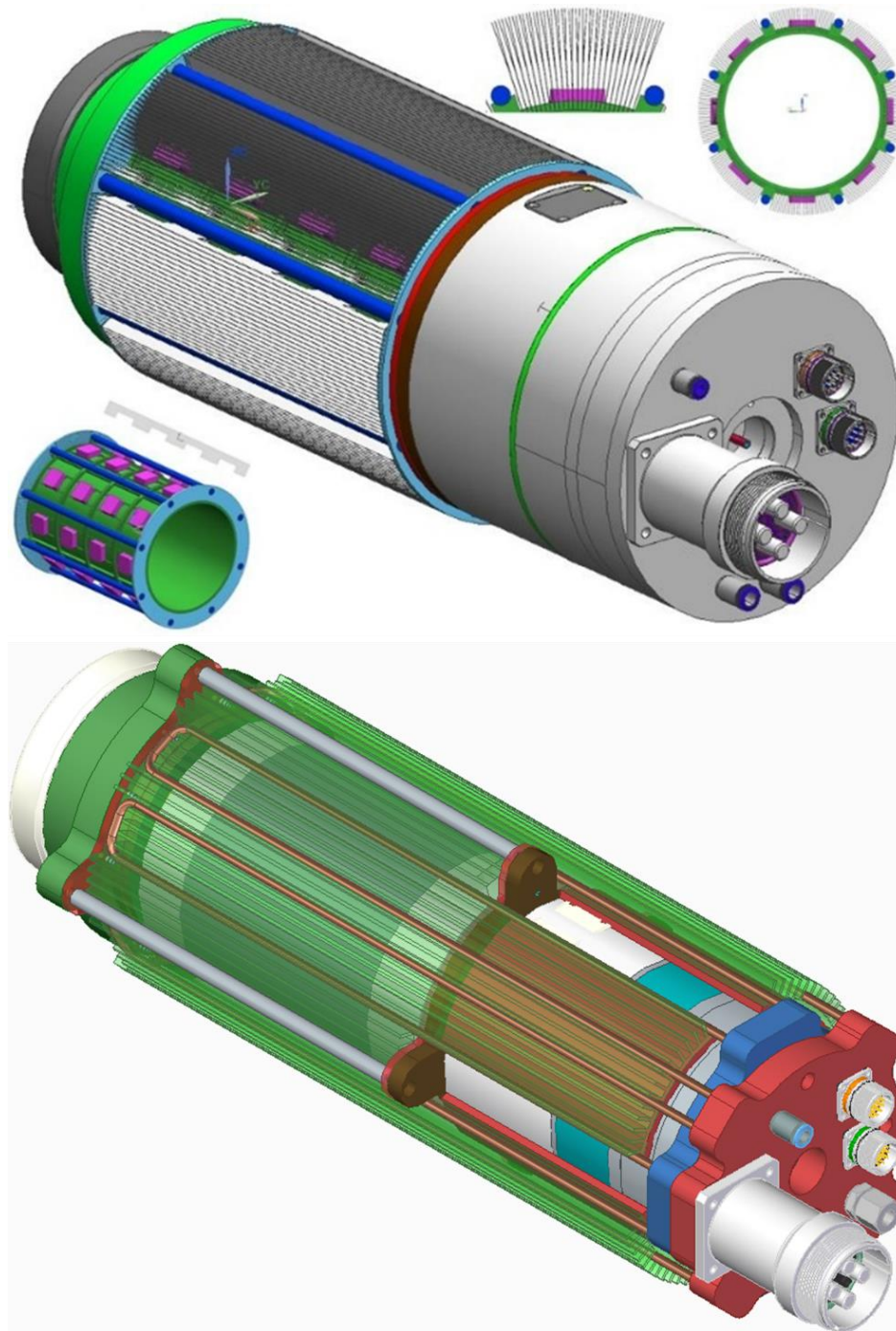


Abbildung 21: V2c: Kühlmantel Bleche radial, V3e: Kühlmantel lang (Rohr)

Eine Weiterentwicklung der Heatpipes in der Computerbranche nennt sich Vapor Chamber. Diese basiert auf dem gleichen Prinzip der Verdampfung und Kondensation eines Arbeitsfluides, ist jedoch nicht rund, sondern in Form von Platten verfügbar. Für den Anwendungsfall war die Plattenbauweise nicht optimal integrierbar, weshalb die Vapor Chamber nicht weiterverfolgt wurde. Zur erzwungenen Kühlung wäre es effizienter, wenn nicht nur Luft mit Raumtemperatur bewegt wird, sondern wenn kalte Luft, im Idealfall sogar mit erhöhtem Druck, verwendet werden kann. Ein solches Prinzip existiert unter dem Namen Wirbelrohr (Vortex Tube), auch bekannt als „Ranque Vortex Tube“, „Hilsch Tube“, „Ranque-Hilsch Tube“ oder „Maxwell’s Dämon“. Im Wirbelrohr wird aus normaler Druckluft von 5 bar bis 7 bar ein Luftstrom mit Heißluft und ein Luftstrom mit Kaltluft erzeugt, die in gewissen Grenzen regelbar sind. Dieses System ist frei auf dem Markt verfügbar und könnte als Kühlmedium für das Konzept V3e: Kühlmantel lang (Rohr) und Konzept V3f: Kühlmantel lang (Kanal) eingesetzt werden. Für die im bisherigen Verlauf des Projektes erstellten Varianten wurden die wärmeübertragenden Kühlflächen ermittelt, sowohl die derzeit im CAD vorhandene Kühlfläche bei einem Außen-durchmesser von 190 mm als auch die maximal mögliche Kühlfläche, wenn der Durchmesser auf 250 mm ausgereizt wird.

3.4 AP5: Experimentelle Untersuchungen

Ziel war die Durchführung, Auswertung und Dokumentation experimenteller Untersuchungen zur Identifizierung und Validierung strömungs-, fertigungstechnischer und additiver Gesichtspunkte der Leichtbau-Motorspindel-Komponenten. Das **Fraunhofer IPA** leitete die experimentelle Durchführung und Auswertung von unterschiedlichen Versuchsreihen. Der strukturierte Versuchsplan wurde durch Roschiwal und Reckerth begleitet, während die anschließende Fertigung der Proben durch die Hochschule Aalen umgesetzt wurde.

Einerseits sollten verschiedene Ausführungen eines Kühlkörpers, die Strömungsgeschwindigkeiten am Ein- und Auslauf der Kühlluftführung sowie die Temperaturfelder der Luftumgebung, verschiedene Werkstoffpaare und Zusammensetzungen getestet werden. Andererseits dienten die Versuche zur Validierung der numerischen Simulationen. Additiv selbstgefertigte Lüfter wurden zur Generierung eines Massendurchsatzes innerhalb der Kühlrippenleitungen und zur Untersuchung der damit verbundenen strömungstechnischen Eigenschaften genutzt, um die technologischen Anforderungen an den erforderlichen Volumenstrom für maximale Kühlleistung zu identifizieren. Dabei wurden auch marktübliche Lüfter berücksichtigt.

Darüber hinaus sollten thermische Untersuchungen durch Variation der Gitterstruktur (z. B. Wabenstruktur) und der strukturellen Integrität (z. B. Füllgrad) sowie die erreichbare Fertigungsqualität und Rauigkeit infolge der additiven Fertigung und eventueller nachgeschalteter subtraktiver Fertigungsverfahren thematisiert werden.

Mit Abschluss von Arbeitspaket 5 wurde der **zweite Meilenstein** erreicht, der durchgeführte, ausgewertete und dokumentierte Experimente zur Validierung strömungstechnischer, fertigungstechnischer und thermischer Aspekte umfasste.

Fraunhofer IPA:

Nachfolgend werden die unterschiedlichen experimentellen Untersuchungen präsentiert mit ein eigenen Unterkapitel, damit der Leser den Überblick nicht verliert.

3.4.1 Untersuchung kleiner Kühlproben

Zur frühzeitigen Untersuchung der ersten Kühlkörper, bei einer gleichzeitigen wirtschaftlichen Nutzung der vorhandenen Mittel wurden kleine Proben additiv hergestellt. Die Proben wurden in Anlehnung an [1]⁷ entworfen. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass gleichzeitig eine Anpassung der Rippen über die vorhandene Fläche erzielt werden kann.

Abbildung 22 zeigt die ersten additiv gedruckten Proben. Die Rippen wurden so entworfen, dass eine Anpassung der Rippendichte erfolgen kann. Zur Vergleichbarkeit wurden ebenfalls Rippen ohne Deckel additiv hergestellt.



Abbildung 22: Erste additiv hergestellte Prüfkörper

Die Proben wurden mittels metallischen 3d-Druck hergestellt. Als Material wurde Aluminium AlSi10Mg genutzt. Die Proben wurden bilanziert, experimentell untersucht und bewertet.

⁷ Struve, Arnd. *Generatives Design zur Optimierung additiv gefertigter Kühlkörper*. Springer Vieweg, 2021.

3.4.2 Heatpipe Untersuchungen

Zur Übertragung der Heatpipes in den konstruktiven Aufbau der ausgewählten Motor-spindel wurde im Gesamtkonsortium die Durchmesser 4 mm, 6 mm und 8 mm identifiziert, die im Rahmen des vorliegenden Arbeitspaketes näher untersucht wurden. Zur Durchführung der Heatpipe-Untersuchungen zur Ermittlung der thermischen Eigenschaften der Heatpipes wurde ein vereinfachter Aufbau aus Wasser als Wärmequelle und ein Aluminiumblock mit einer Bohrung zur Befestigung der Heatpipes als Wärmesenke verwendet. Der Versuchsaufbau wird in **Abbildung 23** gezeigt. Der Zwischenbereich von der Wärmequelle zur Wärmesenke ist zusätzlich thermisch isoliert. Dadurch ist eine Wiederholgenauigkeit des Versuchsablaufs garantiert. Zur vollständigen Einschätzung der Temperatur sind Thermoelemente an Heatpipe (Ende), Aluminiumblock, Wasserquelle und Umgebung angebracht.

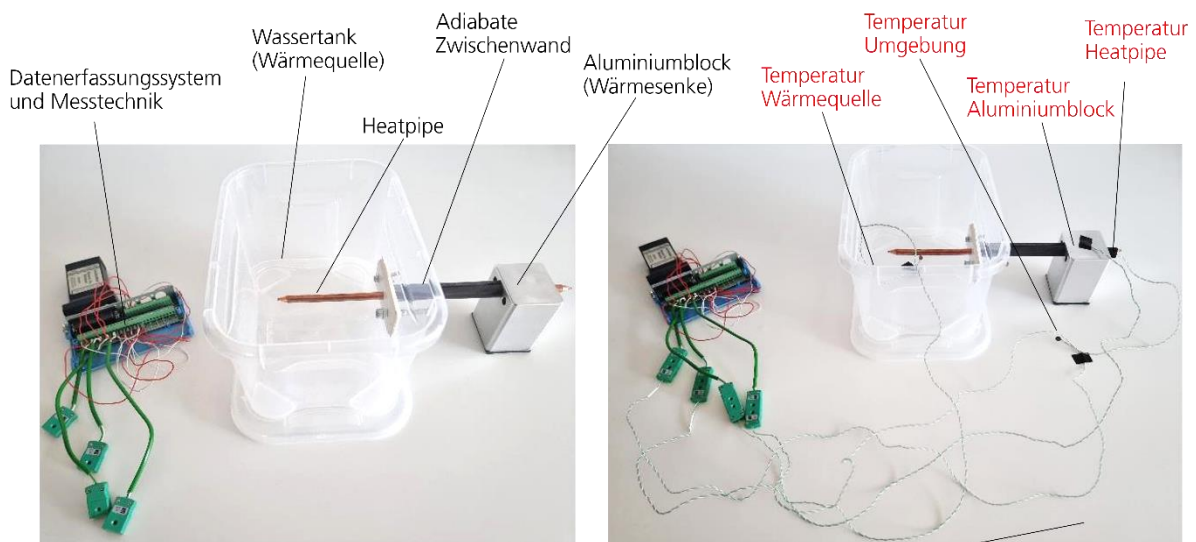


Abbildung 23: angepasster Versuchsaufbau zur Ermittlung der thermischen Eigenschaften der Heatpipes

In den ersten Untersuchungen konnte die gute thermische Reaktionsfähigkeit der Heatpipes von nur wenigen Sekunden bestätigt werden. **Abbildung 24** zeigen die Ergebnisse Heatpipe-Untersuchungen in Abhängigkeit der Durchmesser 4 mm, 6 mm und 8 mm sowie einer Einspannlänge von 50 mm und 100 mm. Darüber hinaus stellen die Diagramme eine Detailaufnahme direkt nach Versuchsstart sowie im eingeschwungenen Zustand.

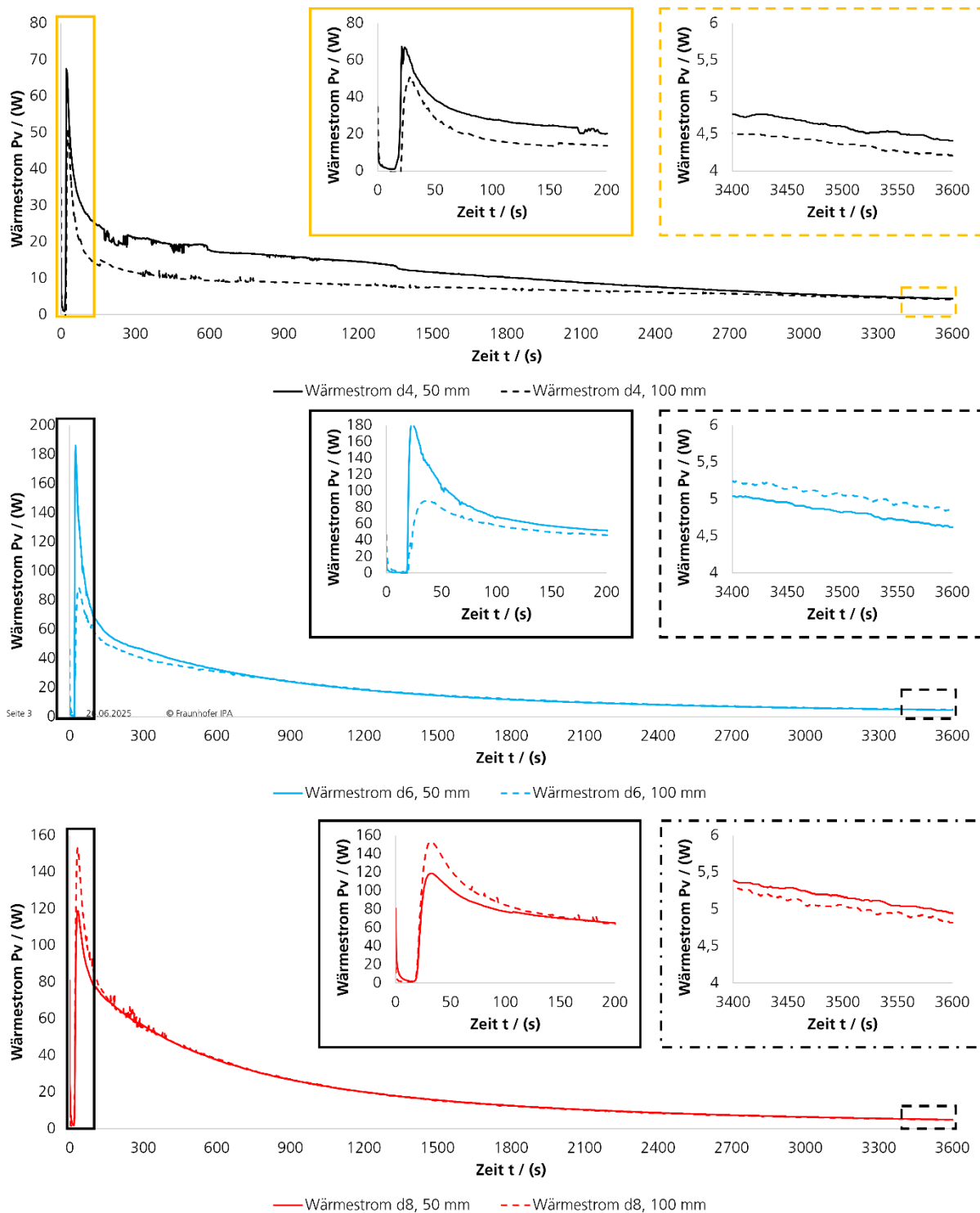


Abbildung 24: Ergebnisdarstellung der Heatpipe-Untersuchung in Abhängigkeit des Durchmessers und Einspannlänge

Die thermischen Untersuchungen der Heatpipes zeigen eine Wärmeabgabe im eingeschwungenen Zustand von ca. 5 W - 7 W (Sekante). Ein Arithmetisches Mittel über die gesamte Versuchsdauer von 3600 s zeigt ein Wärmestrom von ca. 8 W bis 20 W. Da die

Heatpipes vorrangig zur zeitnahen Abfuhr von Wärmestromspitzen (Beschleunigungs- oder Abbremsvorgang) eingesetzt werden sollen, wurde darüber hinaus das arithmetische Mittel bis zu einer Versuchsdauer von 3 Minuten ermittelt. Dieses variiert von ca. 19 W bei einem Durchmesser von 4 mm bis fast 90 W bei einer 8er Heatpipe. Eine Zusammenfassung der Heatpipe-Untersuchung kann in **Abbildung 25** entnommen werden.

Bezeichnung	Ø4 50 mm	Ø6 50 mm	Ø8 50 mm	Ø4 100 mm	Ø6 100 mm	Ø8 100 mm
Temperatur Max	61,29	67,33	70,65	57,83	68,17	71,33
Temperatur Min	24,78	23,91	23,47	24,94	18,28	23,33
Temperaturdifferenz	36,51	43,42	47,18	32,89	49,89	48
Wärmestrom Sekante*	5,22	6,20	6,74	4,70	7,13	6,86
Wärmestrom Mittelung (3600 s)	10,91	18,65	18,94	7,66	15,86	19,67
Wärmestrom Mittelung (180 s)**	30,55	77,70	78,80	19,25	56,10	87,89

*Sekantenberechnung erfolgt über Temperaturdifferenz und gesamter Versuchsdauer

** Berechnung des Mittelwertes wird beginnend von Versuchsstart ermittelt

Abbildung 25: Zusammenfassung der Heatpipe-Untersuchung

Durch die experimentellen Versuche konnte die Leistungsfähigkeit der Heatpipes belegt werden. Nach jetzigem Stand stellen die Heatpipes eine gute Möglichkeit dar, wechselnde Belastungen im Produktionsumfeld bzw. Temperaturspitzen schnell und zeitnah abzubauen. Zusammenfassend werden die Heatpipes als aktives Element in die Leichtbau-Motorspindel integriert.

3.4.3 Rippenuntersuchungen

Im Berichtszeitraum wurden zusätzliche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um einerseits die Simulation zu validieren und den numerischen Fehler zu quantifizieren. Andererseits wurde mit dem validierten Simulationsmodell diverse Rippenparameter ermittelt. Im weiteren Verlauf des Arbeitspaketes wurden thermische Untersuchungen an einem zuvor entworfenen Prüfstand durchgeführt. **Abbildung 26** zeigt die Zielsetzungen der nachfolgenden Rippen-Untersuchungen.

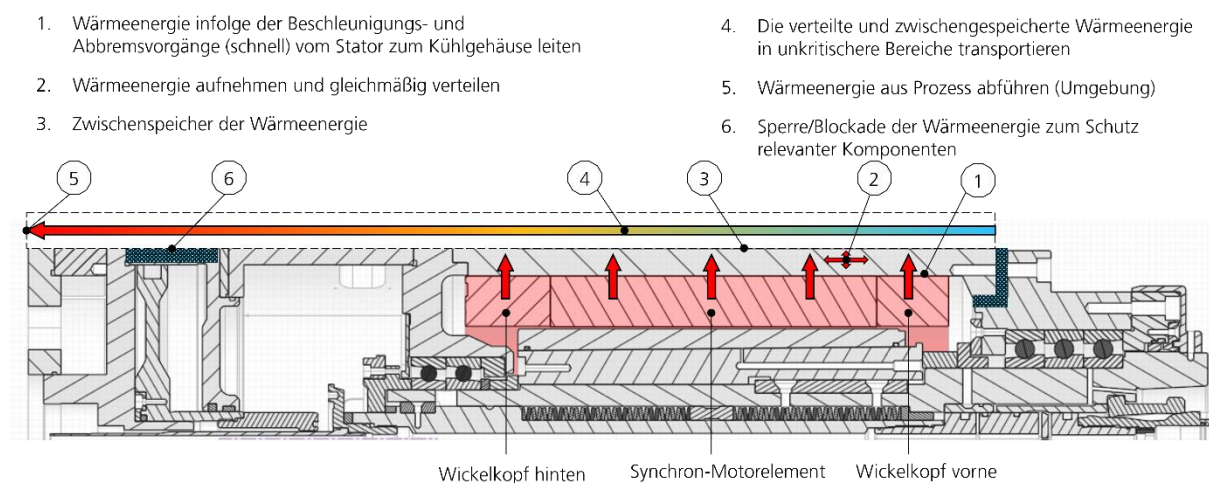


Abbildung 26: Zielsetzungen der Rippen-Untersuchungen

Abbildung 30 zeigt den grundlegenden Versuchsaufbau der ersten beiden Untersuchungsziele. Primär wurden dabei erforscht, wie schnell der Kühlkörper auf entsprechende Temperaturänderungen reagiert und wie sich die Wärmeenergie im Kühlkörper verteilt. Der Kontakt zwischen Grundplatte und Kühlkörper wurde mittels Wärmeleitpaste geschlossen.

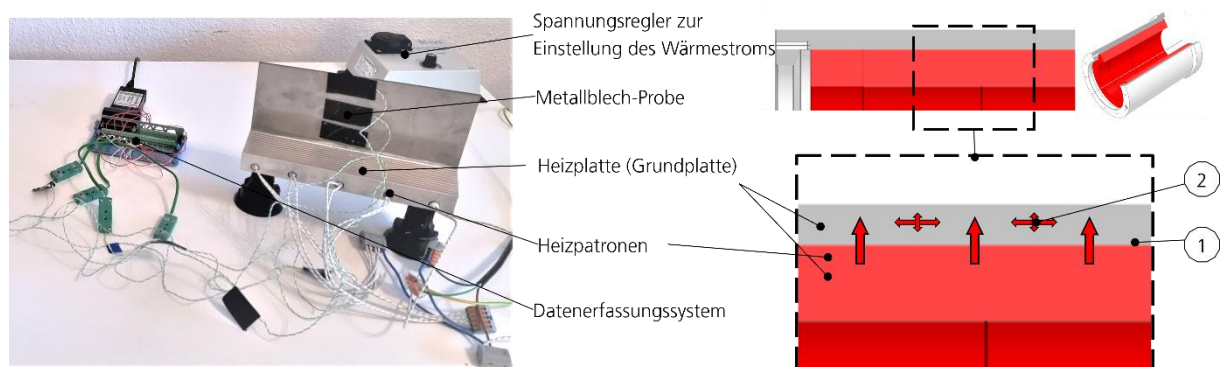


Abbildung 27: grundlegender Versuchsaufbau (Untersuchungsziel 1 und 2)

Die Untersuchungen wurden mit verschiedenen Werkstoffen durchgeführt. Zur Visualisierung wurden die Proben mittels Wärmebildkamera erfasst. Des Weiteren wurden am Fußpunkt und am Endpunkt der Rippen Thermoelemente angebracht. Eine Zeitrafferaufnahme der Wärmebildkamera bei unterschiedlichen Zeitpunkten zeigt **Abbildung 28**.

EDELSTAHL:

ALUMINIUM:

KUPFER:

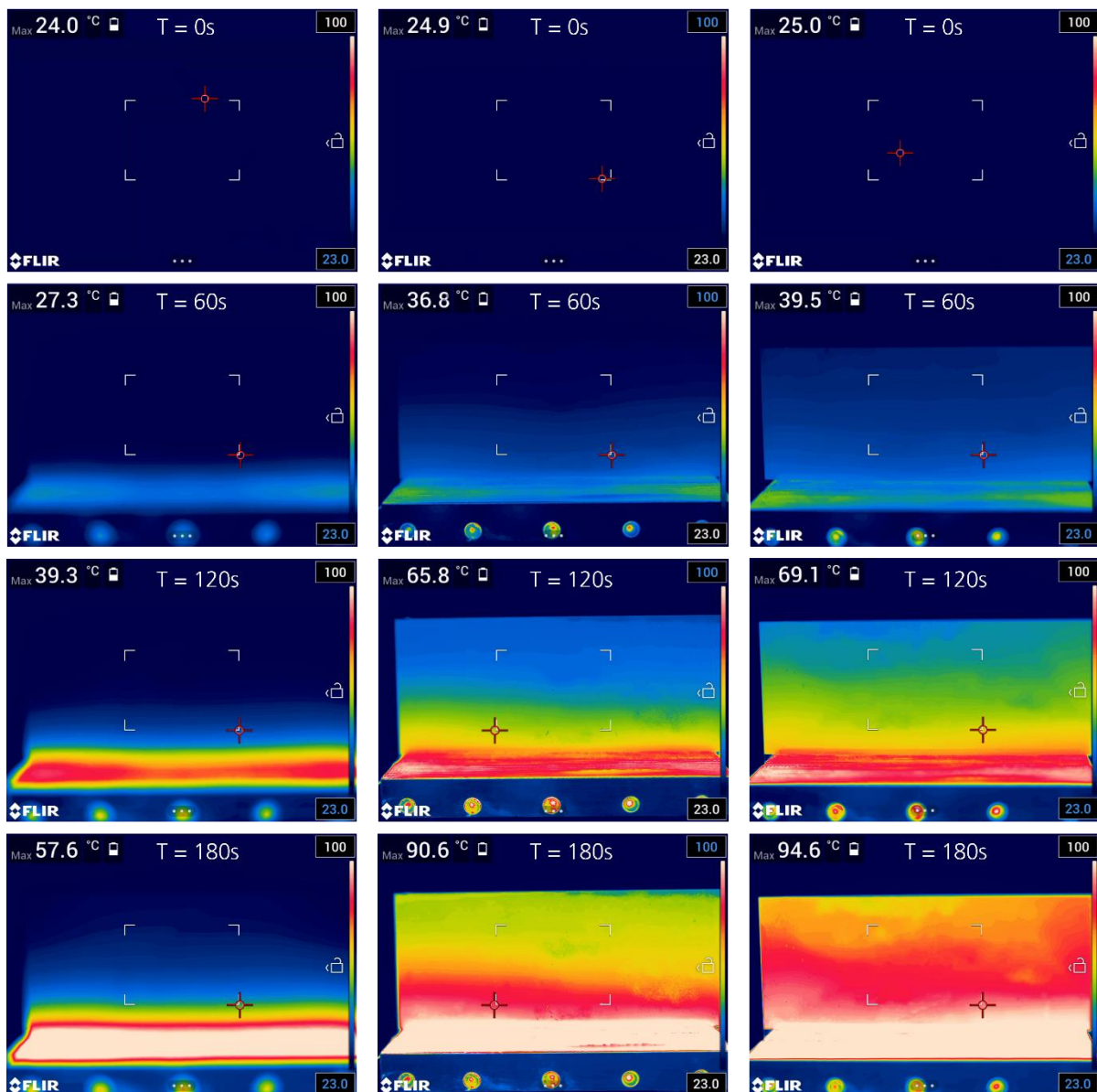


Abbildung 28: Zeitrafferaufnahme mittels Wärmebildkamera

Abbildung 29 stellt die Rippen-Untersuchungen der ersten beiden Untersuchungsziele dar. Nach der Erwärmungsphase von 150 s konnte bei den Metallproben aus Stahl, Aluminium und Kupfer ein Temperaturanstieg von ca. 20 K für eine Dauer von ca. 30 s festgestellt werden. Kupfer hat im Vergleich zu Aluminium eine um 8 % höhere mittlere

Temperatur (Messpunkte unten, Mitte und oben) in der Erwärmungsphase und eine um 9 % höhere mittlere Temperatur im gesamten Versuchszeitraum. Im Vergleich zur gemittelten Temperatur der Grundplatte in der Erwärmungsphase lag eine um 51 % reduzierte Temperatur in Stahl, um 37 % reduzierte Temperatur in Aluminium und um 28 % reduzierte Temperatur in Kupfer vor. Im Vergleich zur gemittelten Temperatur der Grundplatte im gesamten Versuchszeitraum lag eine um 40 % reduzierte Temperatur in Stahl, um 22 % reduzierte Temperatur in Aluminium und um 14 % reduzierte Temperatur in Kupfer vor.

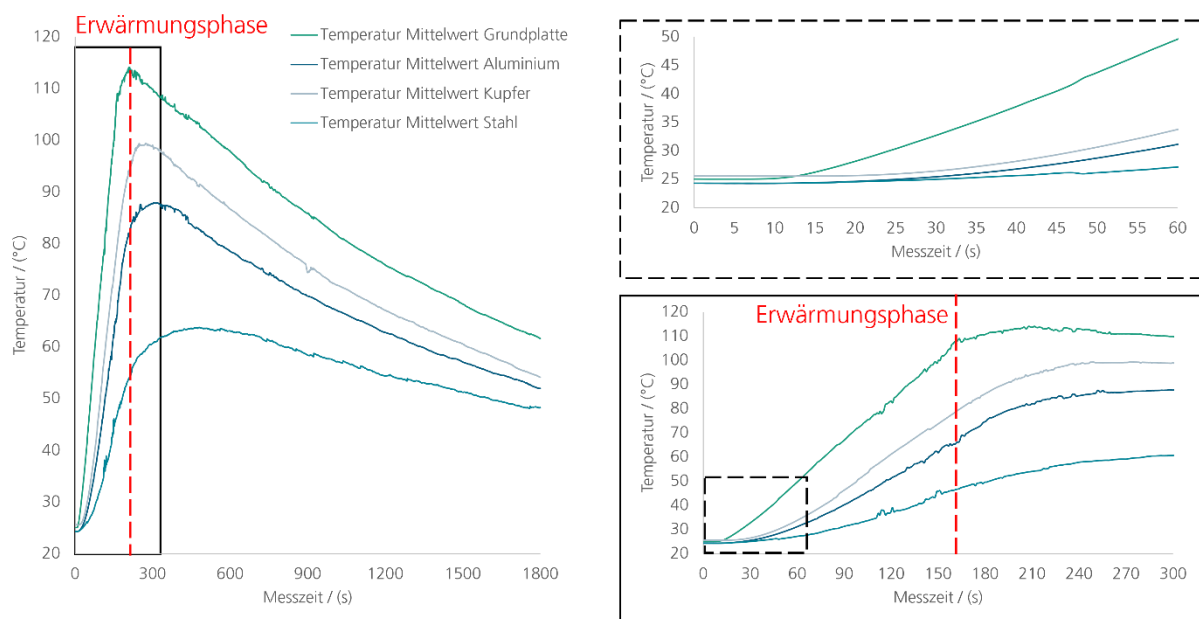


Abbildung 29: Ergebnisse der ersten beiden Untersuchungszielen

Im weiteren Verlauf wurde durch eine Anpassung des Versuchsstandes untersucht, inwiefern eine Abfuhr der aufgenommenen Wärmeenergie in unkritischeren Bereichen erfolgen kann. Weiterhin wurde erforscht, welche Wärmemenge durch den Ventilator mit einem maximalen Volumenstrom von 300 m³/h abgeführt werden kann. Bei maximalen Volumenstrom wird eine Strömungsgeschwindigkeit im Kanal von ca. 15 m/s erreicht. **Abbildung 30** zeigt den grundlegenden Versuchsaufbau.

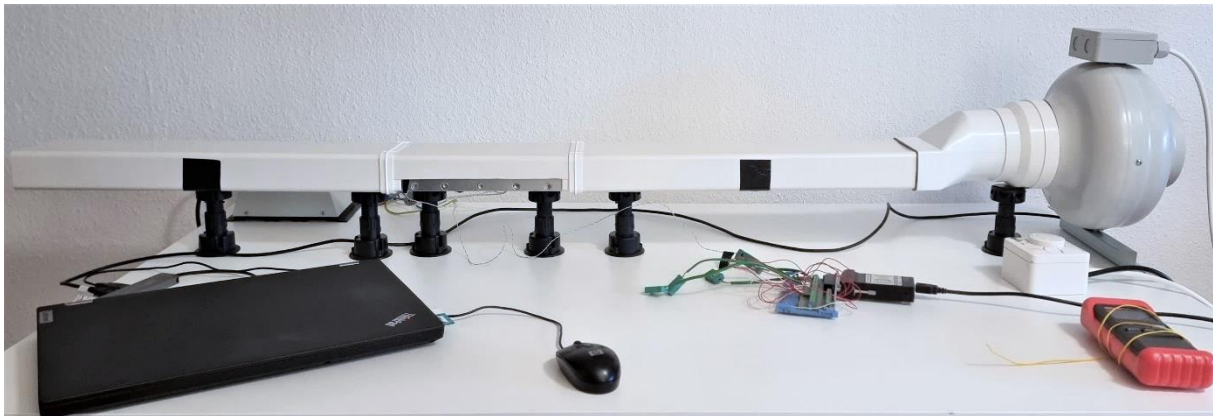


Abbildung 30: grundlegender Versuchsaufbau

Abbildung 31 und **Abbildung 32** zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen an. Der Ventilator mit einem maximalen Volumenstrom von $300 \text{ m}^3/\text{h}$ kann in der Erwärmungsphase ca. 150 W zur Umgebung abführen bzw. in weniger kritischere Bereiche transportiert werden. In diesen Versuchsaufbau wurden keine Rippen verwendet, sondern lediglich die Ausgangsoberfläche der Grundplatte bzw. die Senkungen der Rippenproben. Die Abfuhr des Ventilators stimmt überwiegend mit der analytischen Berechnung mittels erzwungener Konvektion überein. Die Temperatur im Ausgang des Luftkanals steigt innerhalb der Erwärmungsphase um ca. 5 K an

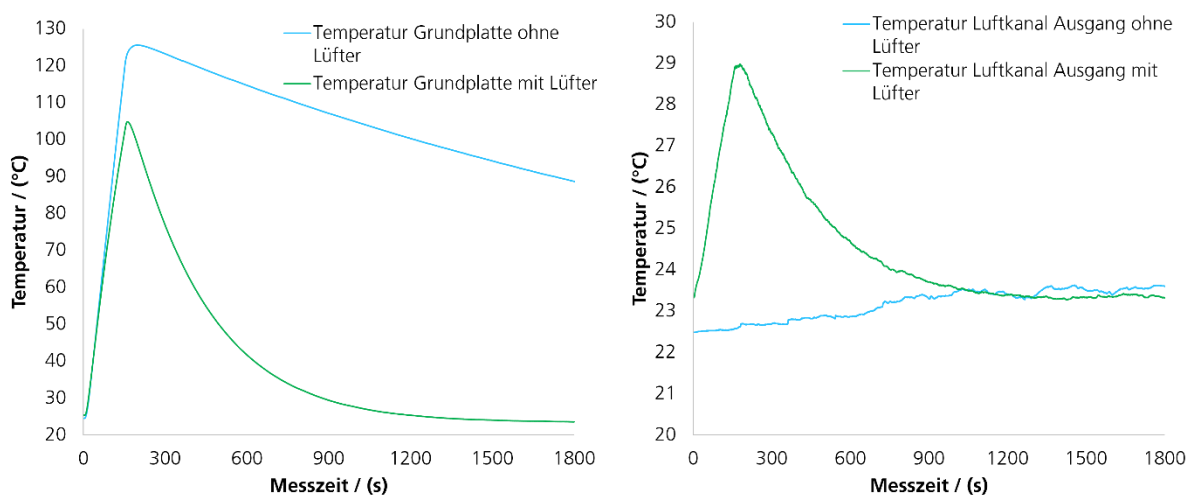


Abbildung 31: Temperaturverlauf vs. Versuchsdauer der Untersuchungsziele 4 und 5

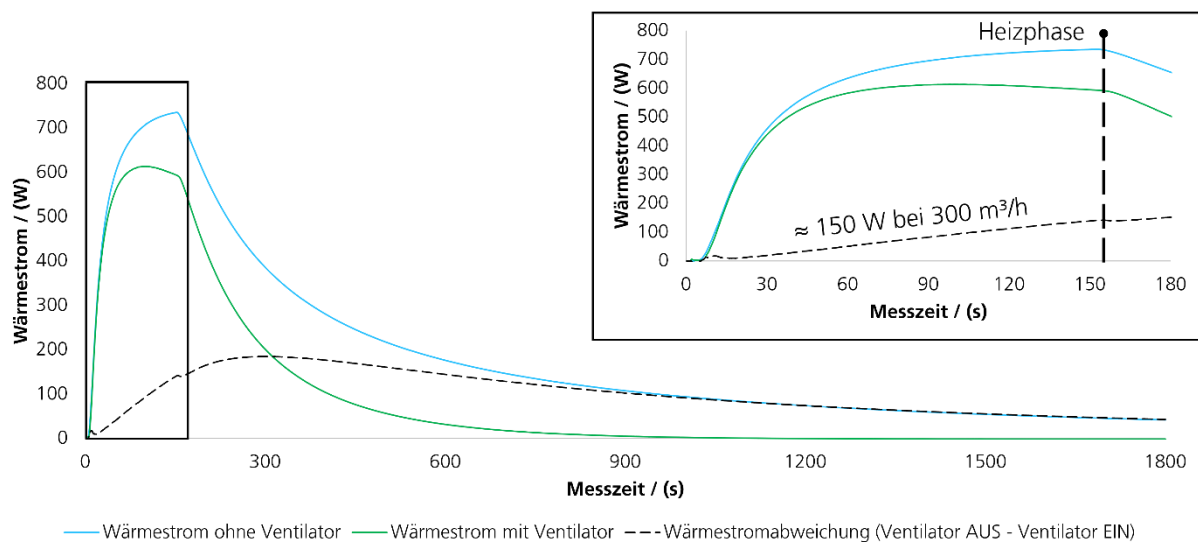


Abbildung 32: Wärmeabgabe mit und ohne Ventilator vs. Versuchsdauer der Untersuchungsziele 4 und 5

Im weiteren Verlauf des Arbeitspaketes wurden experimentelle Untersuchungen geplant, durchgeführt und ausgewertet, um die größtmögliche Rippendichte (Abstand benachbarter Rippen) zu ermitteln.

Abbildung 33 zeigt den grundlegenden Versuchsaufbau. Bei einem zu großen Abstand der Rippen zueinander wird wertvolle Oberfläche zu der Kühlung der Motorspindel verschenkt. Wenn der Rippenabstand hingegen zu klein gewählt wird, kann sich keine Strömung ausbilden und damit keine Wärmeenergie von den Rippen abgeführt werden. Dies kann unter Umständen zum Überhitzen der gesamten Motorspindel führen.



Abbildung 33: Versuchsaufbau zur Ermittlung maximaler Rippendichte

Die Untersuchungen wurden mit einem maximalen Volumenstrom von $300 \text{ m}^3/\text{h}$ und einer reduzierten Wärmestromdichte, sodass sich ein stationäres Temperaturniveau einpendeln kann, bei dem sich die Temperatur der Grundplatte über einen definierten Zeitraum

von 5 Minuten nicht mehr ändert. Die ermittelte stationäre Temperatur der Grundplatte kann dadurch mit der der Simulation verglichen werden. Die Untersuchungen wurden mit einer Variation der Rippen durchgeführt. Einen kleinen Ausschnitt der experimentellen Untersuchungen bei unterschiedlichen Rippen präsentiert **Abbildung 34**.

Experimentelle Untersuchungen

Versuchsaufbau



Abbildung 34: Ausschnitt der Versuchsanordnung bei einer Rippenanzahl von 5, 9, 15 und 20

Der Versuche zeigten, dass durch die Vergrößerung der Rippenanzahl und damit der wärmeübertragenden Oberfläche sich ein stationäres Temperaturniveau einfindet, dass kleiner als die Zielvorgaben des Vorhabens ist. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde die Über-temperatur in Abhängigkeit der Versuchszeit gewählt. **Abbildung 35** stellt diesen Verlauf grafisch dar. Erst ab einer Rippenanzahl höher als 9 stellt sich ein stationäres Temperaturniveau ein, dass kleiner als die gewählte Versuchsgrenztemperatur von 120 °C ist. Der Versuch ohne Rippen und mit einer Rippenanzahl von 1 und 5 wurden bei Erreichen der Versuchsgrenztemperatur abgebrochen. Dadurch stellte sich eine gänzlich andere Temperaturkurve als die mit 9, 15 und 20 Rippen.

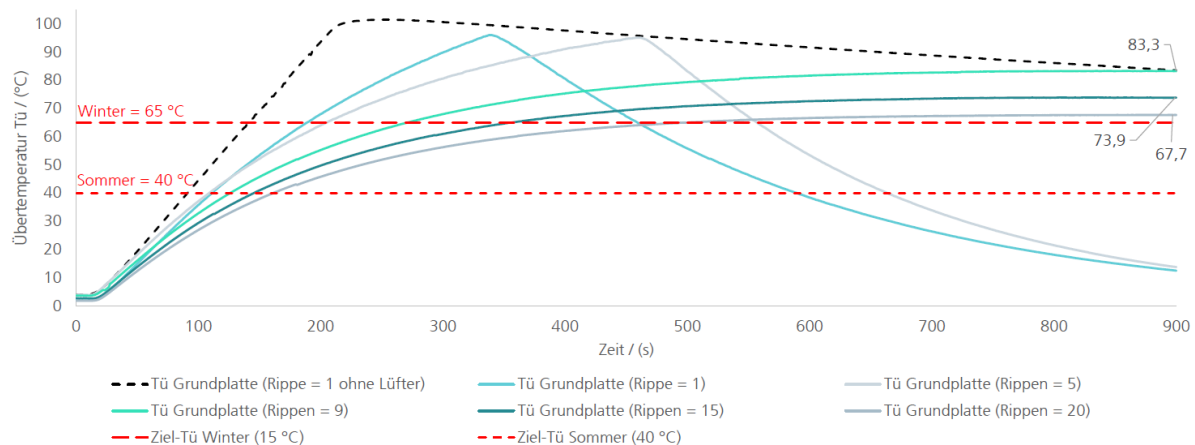


Abbildung 35: Ausschnitt der Versuchsergebnisse mit Rippenanzahl von 9, 15 und 20

Weiterhin zeigte sich, dass mit steigender Rippenanzahl die Temperatur des Luftauslasses ebenfalls steigt. Darüber hinaus konnte ein Übergang festgestellt werden, an den die Temperatur der Grundplatte niedriger als die Maximaltemperatur der Grundplatte liegt. Die Untersuchungen stellten eine Abweichung zwischen Versuch und Simulation im Mittel von 14 % fest (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Weiterhin zeigte sich, dass die Simulationen im überwiegenden Teil eine geringere Temperatur ermittelt wurde. Durch die Laborbedingung der Simulation und mögliche Verluste der Luftströmung durch Leckage im Experiment wird dies begründet.

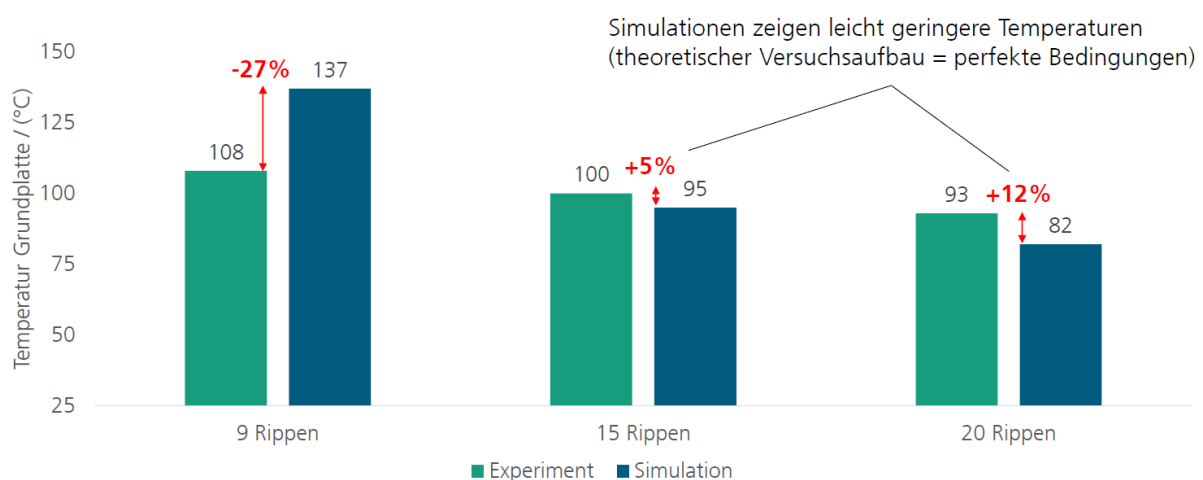


Abbildung 36: Prozentuale Abweichung zwischen Versuch und Simulation

3.5 AP6: Steuerungskonzept

Die bisherigen Untersuchungen, sowohl experimentell als auch computerunterstützt zeigten, dass Lüfter unabdingbar für den sicheren Einsatz der Motorspindel im Produktionsumfeld sind.

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde das Steuerungskonzept erarbeitet. Ziel des Arbeitspaketes war die Entwicklung des Steuerungs- und eines Regelkonzept der Motorspindelkühlung (Hard- und Software) zur Gewährleistung der Funktionalität kritischer Baugruppen und -elemente. Es wurde eine Strategie zur Steuerung der Gebläse in Wechselwirkung mit der aktuellen Leistungszufuhr zur Motorspindel und den Informationen der in Motorwicklung und Kühlmantel integrierten Sensorik erarbeitet. Die Steuerung der Lüfter kann über eine eigenständige Kleinststeuerung oder über die integrierte Steuerung der zugehörigen Werkzeugmaschine und/oder Motorspindel realisiert werden. Durch Auswertung der aktuellen Informationen (z. B. Leistungszufuhr, Drehzahl) kann so frühzeitig auf den zu erwartenden Wärmeeintrag der Motorspindel reagiert werden. Dadurch können lokal eingesetzte Lüfter, je nach Leistungsniveau der Motorspindel zu- oder abgeschaltet werden, um so den notwendigen Energiebedarf der Lüfter zu reduzieren und gleichzeitig die Energieeffizienz solcher Systeme verbessern. Dabei sollen Störfaktoren (z. B. Umgebungstemperatur) und Verschmutzungsgrad der Kühlluftführung infolge der Zerspanung einfließen. Nach Abschluss des Steuerkonzeptes wurde durch das **Fraunhofer IPA** eine Überwachung und Sicherstellung der Funktionalität kritischer Baugruppen und Bauelemente in Form eines Regelkreislaufes erarbeitet.

Fraunhofer IPA:

Im Rahmen der regelmäßigen Projekttermine wurde gemeinsam erörtert, welche technischen Lösungen für eine Frischluftzufuhr und Abfuhr zur Verfügung stehen. In den Regelterminen wurde über neue raumsparende Konzeptvorschläge (zentral eingebettet in Befestigungsflansch, hinterer Spindelbereich) zur Position der Lüfter diskutiert, die auch eine Frischluftzufuhr und Abfuhr gewährleisten (siehe **Abbildung 37**). Für eine dezentrale Ansteuerung der Lüfter im Kühlgehäusemantel um die Motoreinheit, wurden die Simulationen erweitert, dass Lüfter in den einzelnen Segmente Platz finden.

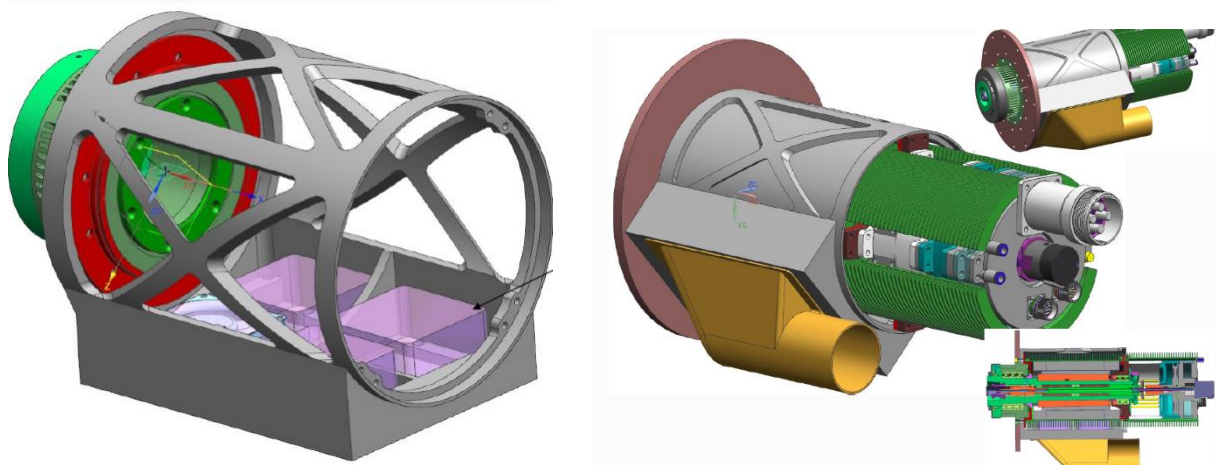


Abbildung 37: Beispiel einer Konzeptidee: zentral eingebettet in Befestigungsflansch, hinterer Spindelbereich

Abbildung 38 stellt eine Auswahl an möglichen Ventilatoren da. Mit Verrechnung der zur Verfügung gestellten Stirnfläche des Kühlluftkanals von $0,098 \text{ m}^2$ und analytischen Ermittlung der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten kann somit der erforderliche Volumenstrom abgeschätzt werden.

Ebm Papst AXIAL Lüfter				
Typ	Volumenstrom / m^3/h	Durchmesser / mm	Strömungsgeschwindigkeit / m/s	Abschätzung Konvektion / $\text{W/m}^2\text{K}$
252 H	4,6	25	2,60	21,361
412 FH	9	40	1,99	18,926
412 H	13,5	40	2,98	22,730
422 JH	38	40	8,40	36,779
512 F	20	50	2,83	22,185
612 JH	33	60	3,24	23,607
622/2 H3P	67	60	6,58	32,787
632/2 HPU	58	60	5,70	30,645
612 NHH-118	56	60	5,50	30,147
612 JH	82	60	8,06	36,060
712 F	44	70	3,18	23,385
8452/2 N	68	80	3,76	25,262
8412 NH	79	80	4,37	27,073
8312 NN	56	80	3,09	23,110
8312 NH4	130	80	7,18	34,164
8312 NH4	222	80	12,27	44,031
3412 NHH	102	92	4,26	26,774
3312 NN	80	92	3,34	23,940
3312 NH3	133	92	5,56	30,289
3212 JH4	280	92	11,70	43,047
3252 JH3	270	92	11,28	42,307

Abbildung 38: Ausschnitt der Übersicht möglicher Lüfter in Abhängigkeit der Lüfteranzahl und des minimal erforderlichen Volumenstroms

3.6 AP7: Entwurf Leichtbau-Motorspindel

Die gewonnenen Ergebnisse aus den vorangegangenen Arbeitspaketen (APs) wurden von allen Projektpartnern zusammengetragen, und ein gemeinsamer Entwurf einer Leichtbau-Motorspindel wurde abgeleitet. Das Arbeitspaket gliederte sich in drei Bereiche, die maßgeblich von Roschiwal und Reckerth überwacht und umgesetzt wurden.

Die erste Sektion beschäftigte sich schwerpunktmäßig mit der Planung und dem Entwurf der vorderen und hinteren Motorspindelabschlüsse. Das grundlegende Ziel bestand darin, Temperaturgradienten und inhomogene Temperaturverteilungen an den Lasterstellen (Innen- und Außenseite) zu minimieren. Um lokale Überhitzungen an kritischen mechanischen Komponenten zu verhindern, die durch kurzzeitig auftretende Motor-Lastspitzen infolge von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen entstanden, widmete sich der zweite Bereich des Arbeitspakets der Entwicklung eines Entwurfs für den optimalen Abtransport der resultierenden Prozesswärme sowie der thermischen Isolierung der Motorspindel. Hierbei sollten unterschiedliche Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit in Hybrid-Bauweise oder durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Variation der Materialstärke) eingesetzt werden, um eine schnelle Abfuhr der Verlustwärme zu Pufferzonen zu ermöglichen.

Im dritten Bereich wurde eine elektrische Isolation relevanter Komponenten erarbeitet, da diese Bauteile einen signifikanten negativen Einfluss auf die Temperatur haben konnten. Das **Fraunhofer IPA** begleitete das Arbeitspaket durch Simulationen, um die aus den thermischen Anforderungen resultierenden Oberflächengeometrien in eine optimale Leichtbaustruktur zu integrieren, die gleichzeitig den mechanischen Anforderungen an ein Gehäusebauteil gerecht wurde. Zur Identifizierung, Integration und anschließenden Optimierung eines geeigneten Entwurfs der erarbeiteten Komponenten waren mehrere Iterationsschleifen vorgesehen. Alle Projektpartner, in Zusammenarbeit mit der Hochschule Aalen, schlossen den Entwurf durch eine fertigungstechnische Prüfung ab.

Arbeitspaket 7 wurde mit dem **dritten Meilenstein**, der Fertigstellung des Konzepts und der Prüfung des Leichtbau-Spindelgehäuses, abgeschlossen.

Fraunhofer IPA:

Im Arbeitspaket „Entwurf Leichtbau-Motorspindel“ wurden die gewonnenen Erkenntnisse während den Regelterminen gemeinsam besprochen und suggestiv neue Ideen eingebaut, die durch statische, dynamische und strömungstechnische Untersuchungen überprüft worden sind. Exemplarisch soll auf **Abbildung 39** des vorderen Spindelbereichs, und die Integration der in zwei Drehrichtungen einsetzbaren Schaufeln zur Verbesserung der Wärmeaufnahme, verwiesen werden. Die Schaufeln orientieren sich an NACA-Profilen, ausgelegt an den vorherrschenden Einsatzbedingungen der Motorspindel.

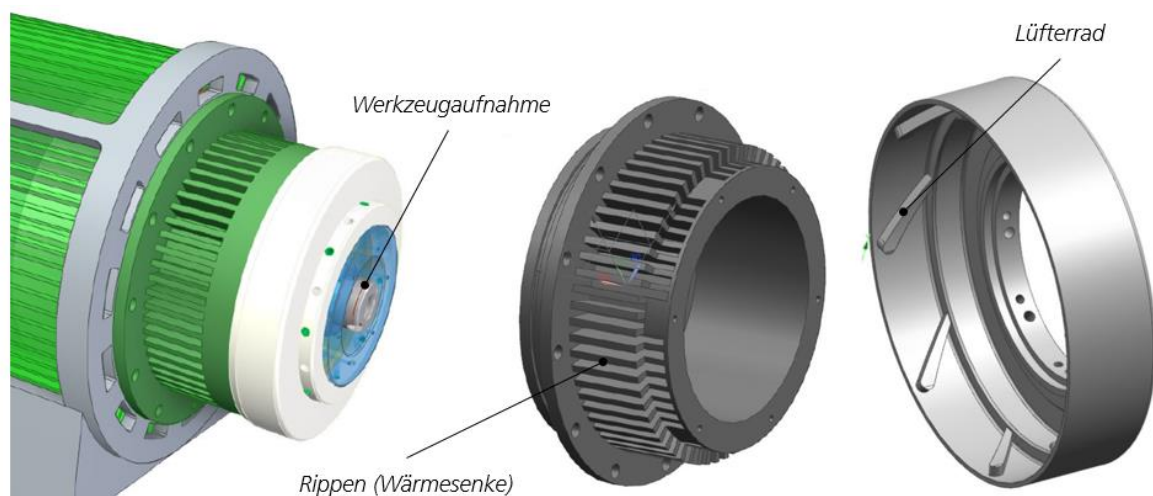


Abbildung 39: Vorderer Spindelgehäuse

Der vordere Spindelbereich um die Spindelnase soll hier aus hochfestem Aluminium hergestellt werden. Dadurch soll einerseits die erforderliche Steifigkeit abgebildet werden und zum anderen kann das Gesamtgewicht der Motorspindel reduziert werden. Das vorher aus einem massiven Block (mit Entlüftungsbohrungen und Anschlüssen) hergestellte Spindelnase, wird durch an der Außengeometrie mit Rippen und ein Lüfterrad erweitert. Dabei dienen die Rippen als Wärmesenke zur Wärmeabfuhr, der von den Hauptlagern erzeugten Wärme.

Das Lüfterrad soll auf die Antriebswelle des Rotors im Bereich um die Werkzeugschnittstelle montiert werden. Das Lüfterrad erzeugt einen Volumenstrom durch Adaptierung der Drehzahl innerhalb des Zerspanungsprozesses. Dadurch kann eine Verbesserung der

Wärmeabgabe der Rippen zur Umgebung gewährleistet werden. Das Lüfterrad ist unabhängig von der Drehrichtung konzeptioniert.

Abbildung 40 zeigt ein Konzept des Gehäuses, das mit Unterstützung der FEM hinsichtlich Verformung und Steifigkeit optimiert wurde. Diese Variante ist insbesondere für das generative Fertigungsverfahren 3D-Druck geeignet und mit konventionellen Fertigungsverfahren nur bedingt realisierbar ist und damit auch nur kostenintensiv herzustellen.

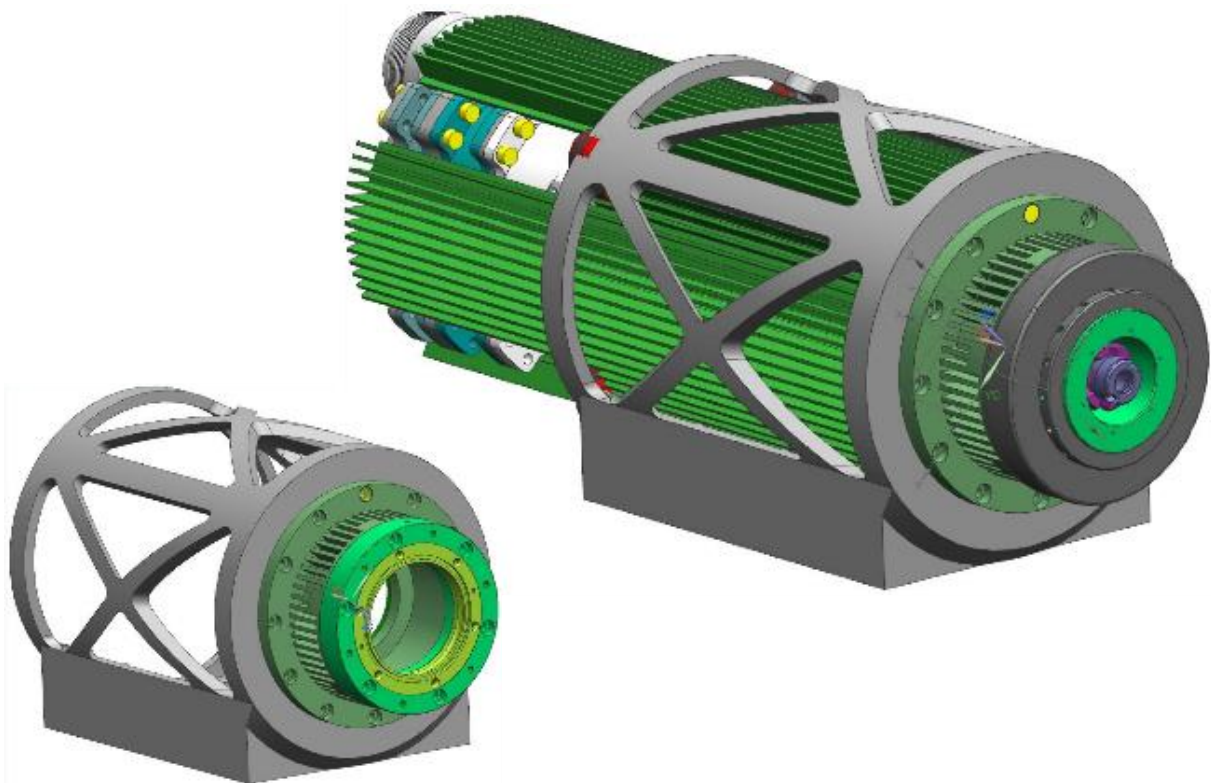


Abbildung 40: V4.1: Gehäuse 3

3.7 AP8: Entwurf Kühlkörper

Roschiwal erarbeitete zusammen mit dem Fraunhofer IPA ein Konzept für den optimalen Wärmeübergang von thermisch hochbelasteten Komponenten und Bauteilen (z. B. Wicklung) zum Kühlmantel. Weiterhin konzipierte Roschiwal einen Entwurf zur Erzielung einer optimalen Kühlwirkung eines Kühlmantels. Dabei kamen sowohl die möglichen Freiheitsgrade der additiven Fertigung zur Verbesserung konvektiver Effekte sowie zur Steigerung der Kühloberfläche als auch strömungsgünstig angeordnete und auf die thermische Übertragung hin gestaltete Geometrien der Kühlrippen zum Einsatz.

Aufgrund der niedrigeren spezifischen Wärmekapazität von Luft musste zur Erzielung einer optimalen Kühlwirkung generell eine größere Kühloberfläche vorgesehen werden. Das **Fraunhofer IPA** untersuchte hierbei grundlegende Fragestellungen zur Findung einer maximalen Kühloberfläche unter Einhaltung von Leichtbauaspekten (schlanker Kühlmantel) und technologischen Aspekten. Weiterhin analysierte das **Fraunhofer IPA** die Kühlluftführung unter strömungstechnischen Aspekten und möglichen abrasiven Verschleißerscheinungen durch Kavitation oder ähnliche Mechanismen.

Zielsetzungen waren hierbei die Sicherstellung eines gleichmäßigen Temperaturfeldes für leistungsstarke Motorspindeln über den gesamten Kühlkörper sowie fertigungsspezifische Gesichtspunkte (z. B. Längierung in Achsenrichtung). Mögliche Lösungsansätze wurden durch komplexe Kühlluftführungen mit längerer Verweilzeit und Steigungsverlauf, durch Querschnittsveränderungen im Kühlkanal in diskreten Zonen oder durch die Erhöhung von Flächen im Bereich des Wärmeübergangs berücksichtigt. Nach gemeinsamer Identifizierung eines passenden Konzeptes analysierte das **Fraunhofer IPA** die mechanischen Eigenschaften durch abschließende FEM-Simulationen.

Mit dem Abschluss des Arbeitspaketes wurde der vierte Meilenstein „Abschluss des Kühlkörpers und Motorgehäuseentwurfes“ abgeschlossen

Fraunhofer IPA:

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchung im AP 5 eines Viertel-Segmentes des Stators, wurden ergänzende Berechnungen durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben. Der Wärmeübergangskoeffizient ist über die Rippenlänge nicht konstant. Weiterhin hat dieser einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Temperatur des Kühlgehäuses. Eine Vergrößerung des Wärmeübergangskoeffizienten um den Faktor 10 reduziert die maximale Temperatur um Faktor 8,5.

Die Breite der Rippe hat einen sehr geringen Einfluss auf das resultierende Temperaturfeld des Kühlgehäuses. Die wärmeübertragene Kühlfläche steigt nur sehr gering an (Kopfseite: Länge x Breite der Rippe). Es ist weiter davon auszugehen, dass die Temperaturdifferenz zwischen Rippe und Kühlgehäuse sich mit steigender Breite der Rippe exponentiell abfällt (siehe **Abbildung 41**). Ab einer Rippenbreite größer als 2 mm wird eine vermehrte Wärmeaufnahme des Rippenfußpunktes aufgehoben. Daher wird nachfolgend mit einer maximalen Rippenbreite von 2 mm ausgegangen.

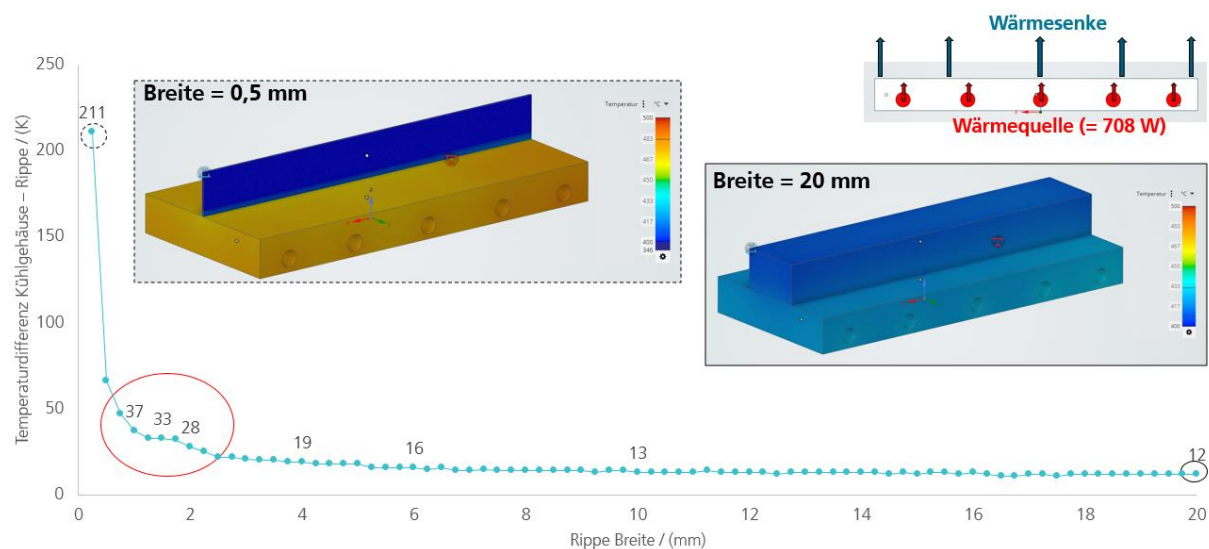


Abbildung 41: Temperaturdifferenz zwischen Kühlgehäuse und Rippe bei Variation der Rippenbreite

Die Rippenhöhe hat im Vergleich zur Rippenbreite einen größeren Einfluss auf die Wärmeabfuhr. Die wärmeübertragende Oberfläche steigt durch die beiden Seitenflächen in Vergleich zu der Kopf- und Fußfläche stärker an. Als Einschränkung sollte die Rippenhöhe nicht beliebig hoch angesetzt werden. Einerseits wird dadurch das gesamte Volumen der

Motorspindel vergrößert (entgegen der Projektidee) und zum anderen wird der Temperaturunterschied zwischen Rippenfußpunkt und Rippenspitze größer, dass zu einer Verringerung der Wärmeabfuhr führt.

Ab einer Rippenhöhe von ca. 25 mm ergibt sich ein Schnittpunkt zwischen der Temperaturdifferenz von Rippe (Rippenspitze und Rippenfußpunkt) und Kühlgehäuse (Grundplatte und Rippe). Aus diesen Gründen wird zur Konzeptionierung der Rippen von einer Höhe von 25 mm ausgegangen (siehe **Abbildung 42**). Dies stellt gleichzeitig auch das maximal mögliche Maß des Außendurchmessers der Leichtbau-Motorspindel dar.

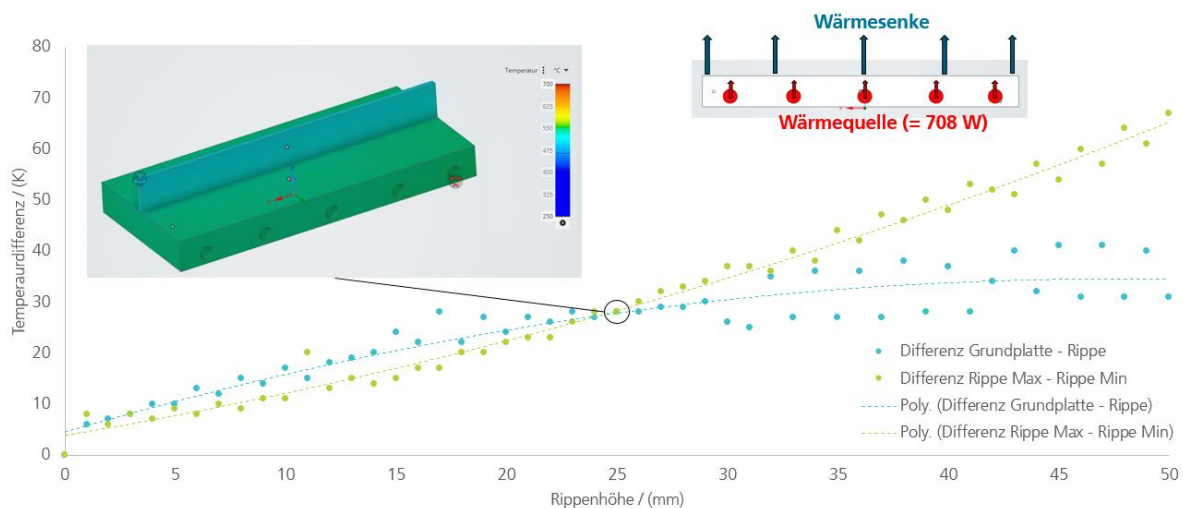


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Temperaturdifferenz der Rippe (Max - Min) und der des Kühlgehäuses zur Rippe

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden die geometrischen Dimensionen der Rippengeometrie identifiziert: Breite: 2 mm, Höhe: 25 mm, Länge 220 mm, Material Kühlgehäuse: Aluminium, Material: Rippen

Zur Quantifizierung der Wärmeabgabe pro Rippe, der lokal abweichenden Wärmeaufnahme mit steigender Rippenlänge, der dazu notwendigen konstruktiven Anpassung der Rippe und die erforderliche Rippenanzahl für eine Maximaltemperatur kleiner als 80 °C wurden zusätzliche numerische thermische Berechnungen durchgeführt. Der Versuchsaufbau der Simulation kann durch **Abbildung 33** entnommen werden. Beispielhaft zeigt

Abbildung 43 das ermittelte Geschwindigkeits- und Temperaturfeld einer Eingangsgeschwindigkeit von 15 m/s und einer Rippenanzahl von 15.

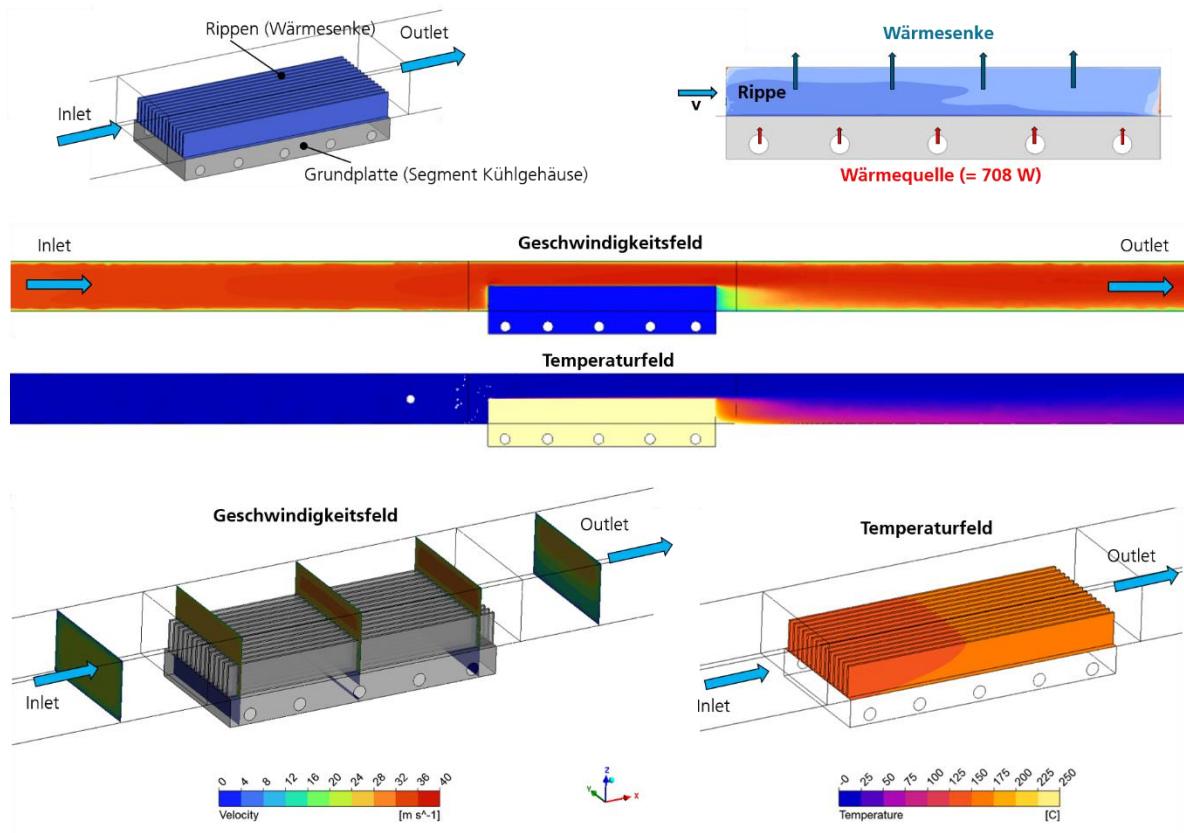


Abbildung 43: Grundlegender Simulationssaufbau und Ergebnisdarstellung des Geschwindigkeits- und Temperaturverlaufes einer Eingangsgeschwindigkeit

Die Untersuchungen bestätigen, dass ab einer Rippenanzahl größer als 14 Stück und einer Strömungsgeschwindigkeit des Lüfters von 15 m/s eine Maximaltemperatur kleiner als 80 °C vorherrscht. Zur Verdeutlichung können die Ergebnisse aus nachfolgender Abbildung entnommen werden (siehe **Abbildung 44**). Die ermittelte Maximaltemperatur wurde mit der Zieltemperatur von 80 °C normiert. Werte größer als 1 entsprechen eine höhere normierte Temperatur und Werte kleiner als 1 entsprechend eine kleinere normierte Temperatur von 80 °C.

Es ist davon auszugehen, dass sich über die gesamte Rippenlänge eine unterschiedlich und lokal abweichende Wärmeabgabe zur bewegten Luft einstellt. Zur Quantifizierung der Höhe der Wärmeabgabe wurde ein Linienpfad in der mittleren Höhe (Höhe 12,5 mm)

der Rippe eingebaut und bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten die Wärmeabgabe ermittelt. Es stellt sich ein Unterschied von ca. 70 W im Laufe der Rippenlänge ein (siehe **Abbildung 45**).

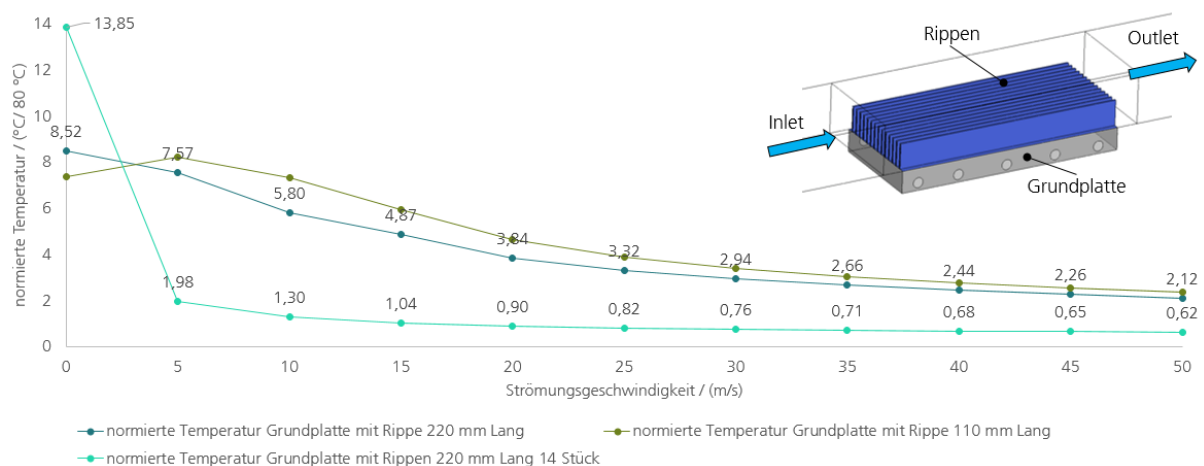


Abbildung 44: Normierte Temperatur des Kühlgehäuses (Grundplatte) auf 80 °C in Abhängigkeit von einer Rippe, einer Rippenanzahl von 14 und einer halben Rippenlänge

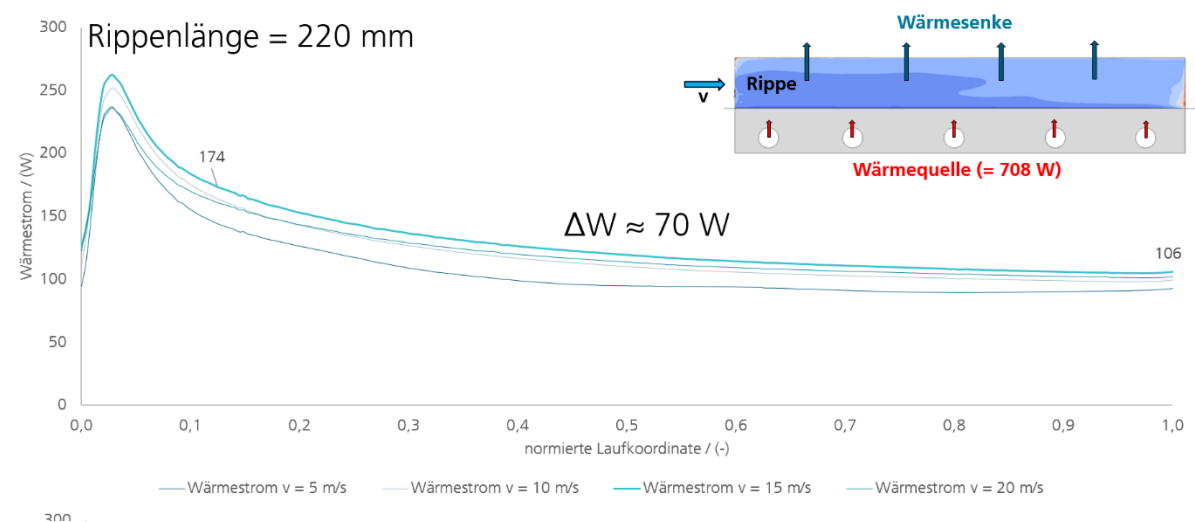


Abbildung 45: Wärmeabgabe in Abhängigkeit der Linienpfadlänge und Strömungsgeschwindigkeit des Lüfters

Zusammenfassend stellt sich im Mittel 45 % verringerte Wärmeabfuhr bzw. vergrößerte Maximaltemperatur mit steigender Rippenlänge ein. Zur Kompensation der Abweichungen wurde die wärmeübertragende Oberfläche mit steigender Rippenlänge vergrößert, sodass sich eine konstante Wärmeabgabe abzeichnet.

Im Rahmen der weiteren Entwicklung eines Kühlkörpers und besseren Ausnutzung des definierten Bauraums wurden numerische Strömungs- und Temperaturuntersuchungen durchgeführt. Das Berechnungsmodell und eingestellten Rahmenbedingungen werden auf **Abbildung 46** gezeigt.

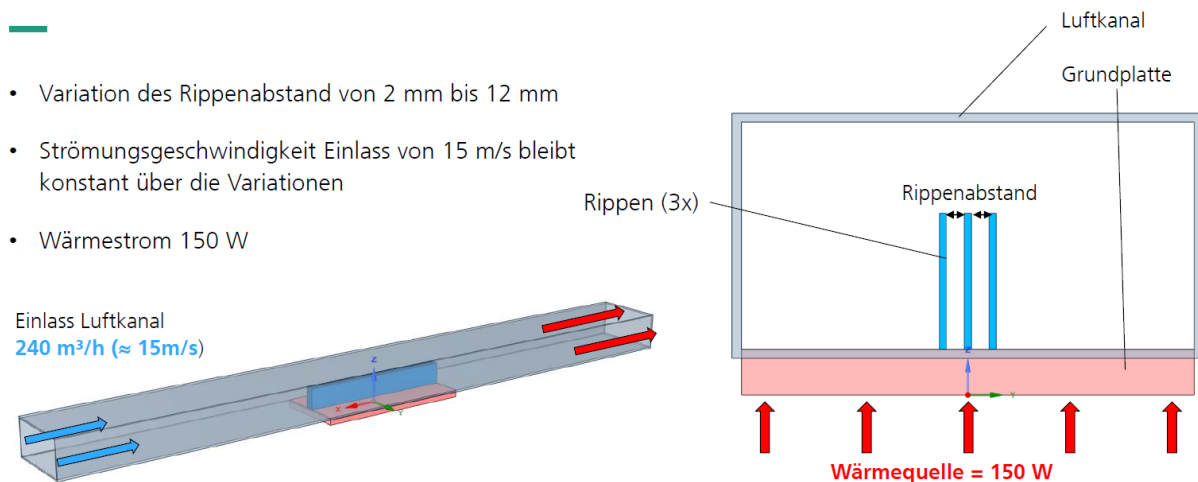


Abbildung 46: Rahmenbedingungen und Berechnungsmodell zur Ermittlung maximaler Rippendichte

Die Untersuchungen konnten einen signifikanten Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb benachbarter Rippen belegen. **Abbildung 47** und **Abbildung 48** stellen die Ergebnisse der Untersuchung in Form der Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher Rippenabstände vor.

Ergebnisvorstellung Simulation Rippenabstand

Strömungsgeschwindigkeit

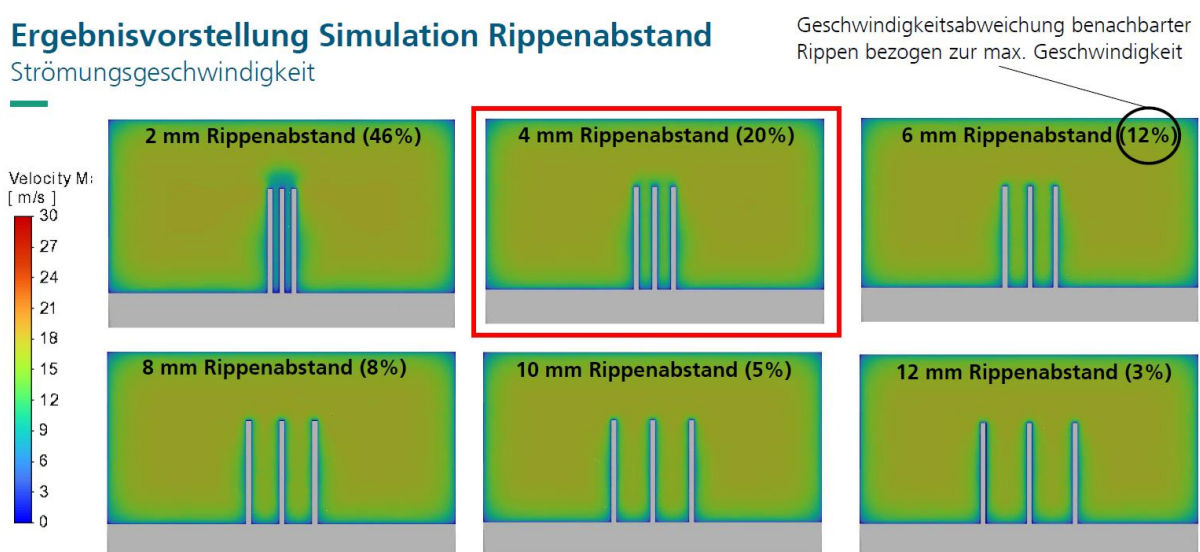


Abbildung 47: Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Rippenabstände

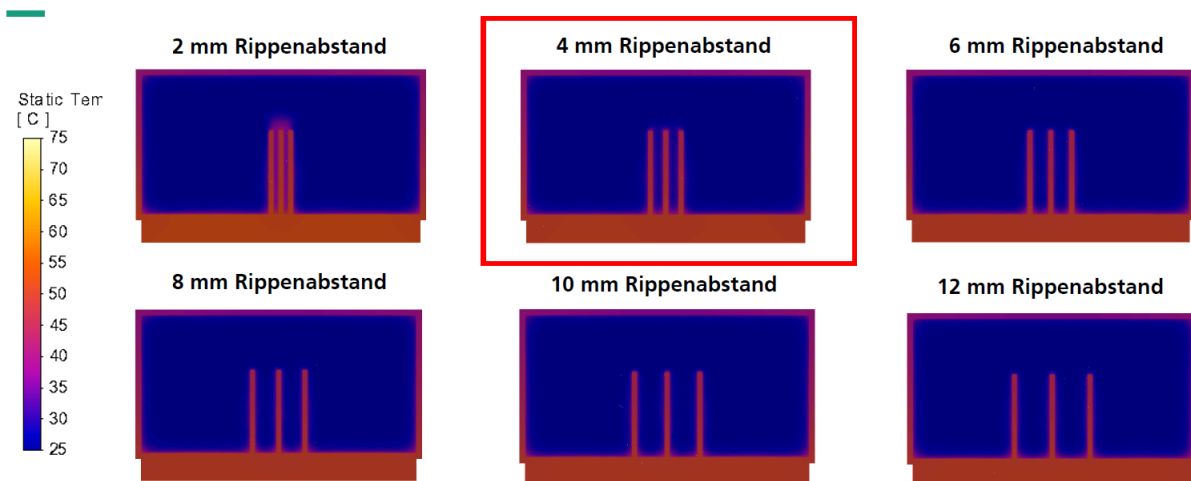


Abbildung 48: Temperatur in Abhängigkeit unterschiedlicher Rippenabstände

Ein Rippenabstand von 2 mm zeigte, dass die Strömungsgeschwindigkeit um 46 % in Vergleich zur Ausgangsgeschwindigkeit eingebrochen ist. Eine genauere Darstellung der Geschwindigkeitsunterschiede kann aus **Abbildung 49** entnommen werden. Darin einhergehen konnte einen deutlichen Anstieg der Temperatur der Rippen (und Grundplatte) festgestellt werden. Mit den Ergebnissen konnte ein minimaler Rippenabstand von 4 mm (< 20 %) identifiziert und somit der vorgesehene Bauraum des Kühlkörpers optimal ausgenutzt werden.

Rippenabstand Minimal

Strömungsgeschwindigkeit

Abstand Rippen	Max. Geschwindigkeit Rippen	Proz. Abweichung zur Max. Geschwindigkeit (17,5 m/s)
2 mm	9,42 m/s	46 %
4 mm	13,92 m/s	20 %
6 mm	15,21 m/s	12 %
8 mm	15,97 m/s	8 %
10 mm	16,44 m/s	5 %

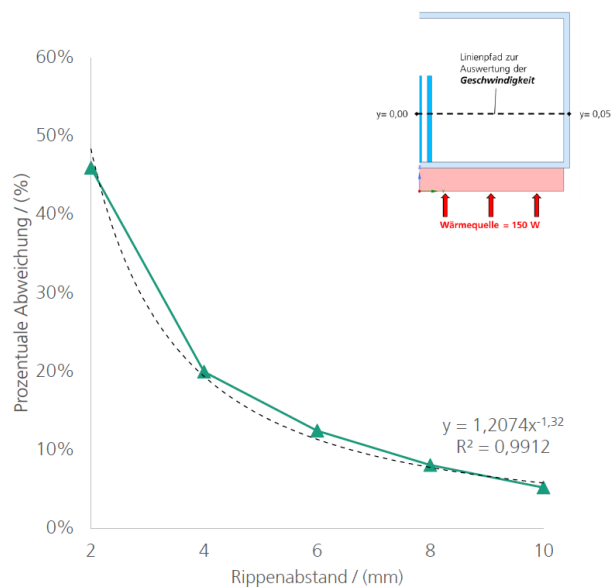


Abbildung 49: Darstellung der prozentualen Geschwindigkeitsunterschiede bezogen auf die Eingangsgeschwindigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Rippenabstände

Im weiteren Entwicklungsprozess wurden Simulationen des vorderen Spindelbereiches durchgeführt. Das Ziel der Untersuchungen war es den Nutzen eines aktiven Kühlers (in Form von Flügel) und die daraus resultierende Temperaturverteilung relevanter Komponenten zu ermitteln. Der vordere Spindelbereich ist durch die thermische Isolierung am Gehäuse weitestgehend von dessen Wärmeströme geschützt. Dadurch wurden in den Untersuchungen ausschließlich der Wärmeenergie (450 W) aus den Hauptlager und des Werkzeuges (Temperatur 70 °C) berücksichtigt. **Abbildung 50** stellt das Berechnungsmodell und die definierten Randbedingung vor.

Ergebnisvorstellung Simulation

Vorderer Spindelbereich

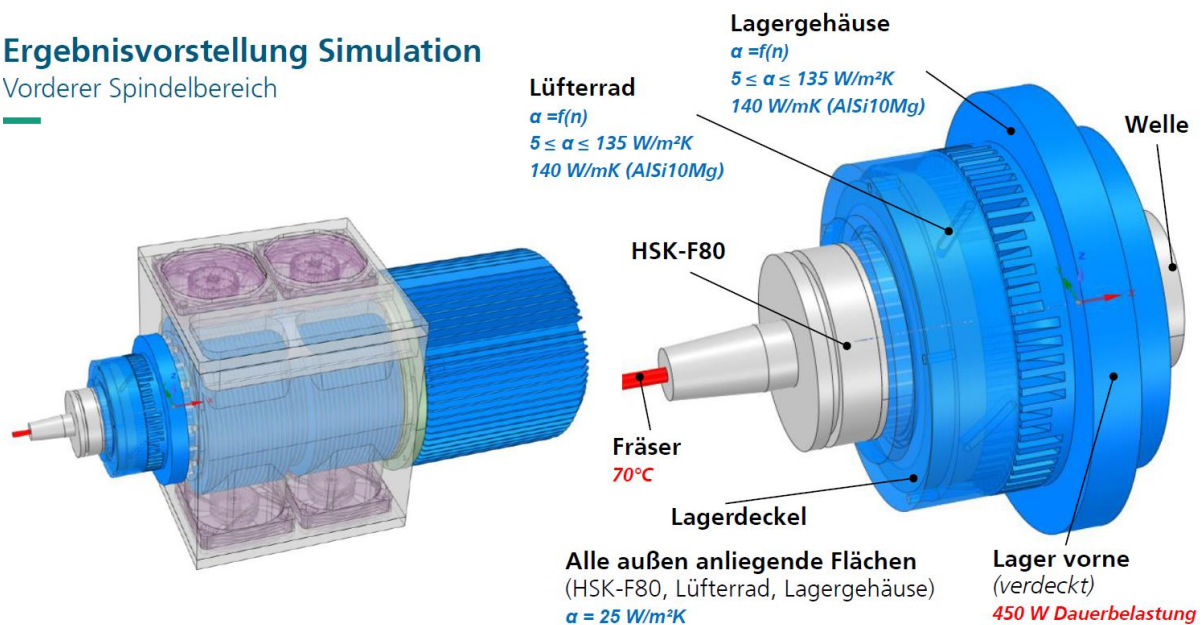


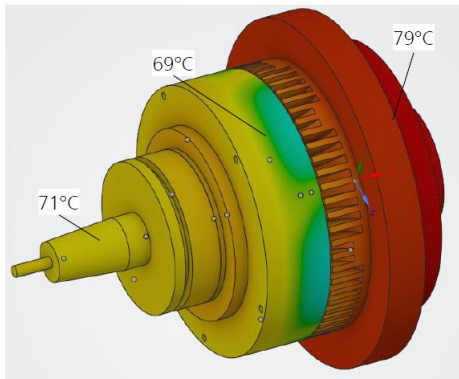
Abbildung 50: Modellaufbau und Randbedingungen zur Analyse der Temperaturverteilung im vorderen Spindelbereich der Leichtbau-Motorspindel

Abbildung 51, **Abbildung 52** und **Abbildung 53** stellen unterschiedliche Designs zur weiteren Verbesserung des Temperaturverhaltens des vorderen Spindelbereiches unter Volllast des Hauptlagers und Werkzeugeinflusses dar. Darauf aufbauend wurde in weiteren Designstufen der Spindelbereich durch radiale Rippen auf dem Laufrad erweitert. Dadurch wurde eine Vergrößerung der Oberfläche von 115 % erreicht, sodass die statische Maximaltemperatur (Lager) von 83,6 °C auf 81,6 °C reduziert wurde.

Ergebnisvorstellung Simulation

Vorderer Spindelbereich

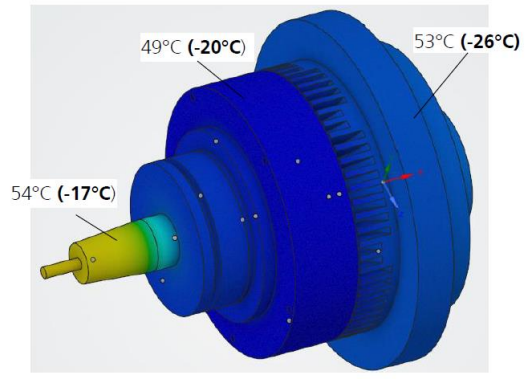
Wärmestrom Lager: **450 W** (ca. 1,5 % P_{ges})
Temperatur Fräser: **70°C**



Maximaltemperatur (Lager): **83,6°C**

Benennung	Wert
LaufRad außen, HSK	25 W/m²K
LaufRad innen, Lagergehäuse	130 W/m²K (entspricht 16.000 RPM)

Wärmestrom Lager: **225 W**
Temperatur Fräser: **70°C**



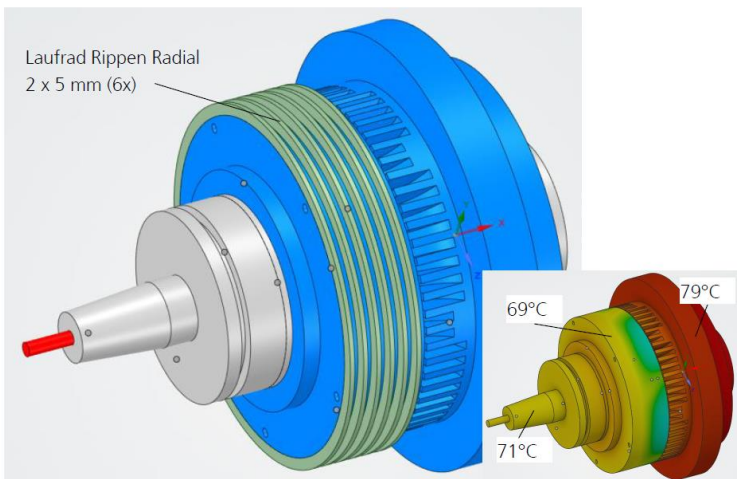
Maximaltemperatur (Lager): **57°C (83,6°C)**

Abbildung 51: Ausgangsdesign zur Untersuchung des vorderen Spindelbereiches unter Belastung des Hauptlagers und Werkzeuges

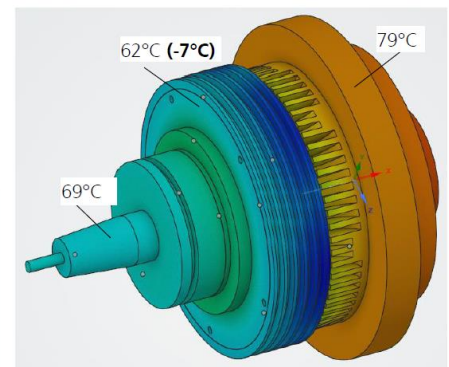
Ergebnisvorstellung Simulation

Vorderer Spindelbereich: LaufRad Rippen Radial

Benennung	Wert
WÜ LaufRad außen vorher	285 cm²
WÜ LaufRad außen nachher	615 cm² (+115%)



Wärmestrom Lager: **450 W**
Temperatur Fräser: **70°C**



Maximaltemperatur: **81,6 (83,6°C)**

Abbildung 52: Design mit zusätzlichen radialen Rippen zur Untersuchung des vorderen Spindelbereiches unter Belastung des Hauptlagers und Werkzeuges

Eine weitere Anpassung der Geometrie des Lagergehäuse und weiterer Vergrößerung der Oberfläche um 21 % führte zu einer Verringerung der Maximaltemperatur auf 73,5 °C (siehe **Abbildung 53**). Im Konsortium wurde die Ideen auf Grundlage der erschwerten Herstellbarkeit durch den additiven Druck (zusätzliche Stützstrukturen) verworfen und auf

den Ausgangszustand der Entwicklung zurückgegriffen (siehe **Abbildung 51**). Falls die Langzeituntersuchungen zeigen, dass der vordere Motorspindelbereich sich ungünstig erwärmt, wird das Design weiter verfolgt.

Ergebnisvorstellung Simulation

Vorderer Spindelbereich: Lagergehäuse verlängert

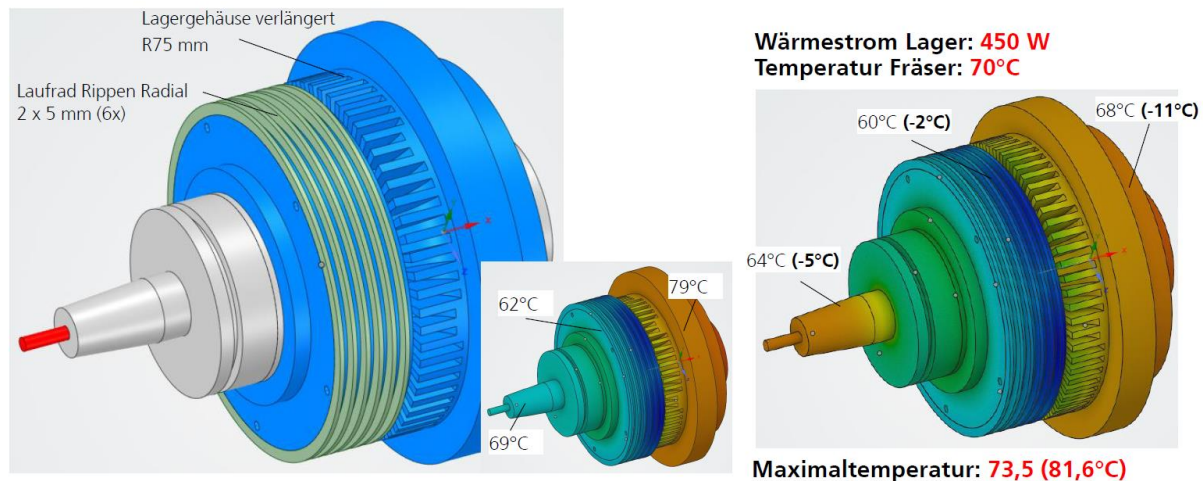


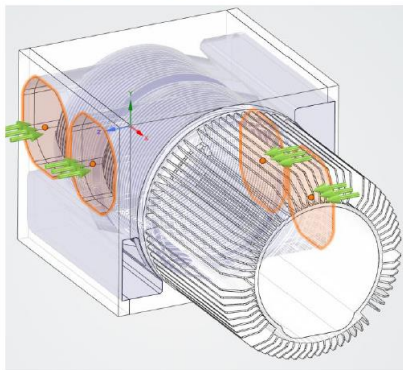
Abbildung 53: Design mit zusätzlichen radialen Rippen und Vergrößerung des Durchmessers des Lagergehäuses zur Untersuchung des vorderen Spindelbereiches unter Belastung des Hauptlagers und Werkzeuges

Im weiteren Projektverlauf wurde das Spindelgehäuse und der hintere Spindelbereich umfassend strömungstechnisch und temperaturspezifisch untersucht. Das Vorhaben sieht vor, dass die Lüfter das Gehäuse und den hinteren Spindelbereich aktiv mit Luft versorgt. Dazu wurde ein Simulationsmodell vorbereitet, die Geometrie vereinfacht (z. B. Lüfter) und im Vorfeld das die zu erwartende Strömungsgeschwindigkeit als Plausibilitätsgrundlage ermittelt **Abbildung 54**.

Zu dem Erzeugen des Luftstroms werde vier Axiallüfter vom Typ 4414FN/39H der Fa. Ebm mit den Abmessungen 119 mm x 119 mm x 25 mm eingesetzt. Jeder dieser Lüfter erzeugt einen maximalen Volumenstrom von 225 m³/h, zusammen erzeugen alle 4 Lüfter im günstigsten Falle einen Volumenstrom von 900 m³/h. Dieser Wert liegt im Bereich der erarbeiteten Erkenntnisse und Festlegungen. Die Lüfter haben dabei eine Drehzahl von 5.400 U/min und einen Schalldruckpegel von 55 dB(A). Die bisher angedachten Lüfter vom Typ

8218JH4 der Fa. Ebm-Papst haben die Abmessungen 80 x 80 x 38 mm, einem Volumenstrom von 222 m³/h bei einer Drehzahl von 14.000 U/min und einem Schalldruckpegel von 71 dB(A). Durch die Änderung der Lüfter reduziert sich die emittierte Lautstärke um einiges bei gleichbleibendem Volumenstrom. Als Konsequenz der Änderung der Lüfter von den Abmessung 80 x 80 x 38 mm auf 119 x 119 x 25 mm sind die in den Anforderungen vorgegebenen maximalen Außen-Abmessungen der Motorspindel von 250 mm x 250 mm nicht mehr möglich. In der Höhe wurden die 250 mm eingehalten. In der Breite wurde die Erhöhung von 250 mm auf 300 mm von allen Projektteilnehmern akzeptiert und zur weiteren Bearbeitung freigegeben

- Fläche = 0,0116 m² (Einlass)
- Volumenstrom max. = 570 m³/h → 0,158 m³/s
- Strömungsgeschwindigkeit $v = 0,158/0,0116 = 13,6 \text{ m/s}$



- Fläche = 0,0031 m² (Auslass)
- Volumenstrom max. = 1140 m³/h → 0,317 m³/s
- Strömungsgeschwindigkeit $v = 0,317/0,0031 = 102,5 \text{ m/s}$

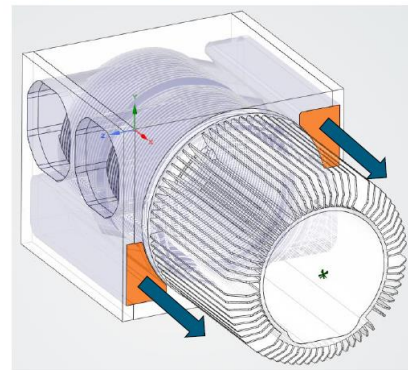


Abbildung 54: Simulationsmodell zur Analyse des Spindelgehäuses und hinteren Spindelbereich

Auf Grundlage der technischen Daten der Lüfter und vorhandenen Eingangsflächen wurde im Simulationsmodell eine Geschwindigkeit von 13,6 m/s als Randbedingung vorgegeben. Die Simulationen zeigten, dass die Luft sich gut um die Gehäusestruktur legt und dann eine 90° Umlenkung erfährt, bevor sie in die Umgebung abstrahlt. Im Bereich der Umlenkung ist eine große Totzone vorhanden, die strömungstechnisch nicht optimal ist.

Um das Durchmischen von Ansaug-Kühlluft mit erwärmter Ausblas-Kühlluft zu unterbinden, wird mit Hilfe eines Deckels die Kühlluft um 90° umgelenkt und strömt durch 2 Austritts-Öffnungen nach hinten aus. Um die 90°-Umlenkung der Kühlluft weicher und strömungstechnisch optimaler zu gestalten, müsste die Breite der Spindel noch einmal vergrößert werden, worauf im ersten Ansatz verzichtet wurde. Mit Hilfe der seitlichen

Deckel könnte dies zu einem späteren Zeitpunkt jedoch mit geringem Aufwand realisiert werden.

Die Simulationen in **Abbildung 55** zeigten, dass die Strömung fast ungehindert in die Umgebung abweicht, ohne entlang der Längsrippen weiter zu verweilen. Um den Luftstrom weiter zur Kühlung nutzen zu können, wurden verschiedene Design entworfen und parallel simulativ untersucht. Hierbei wurde auch ein Fokus auf eine einfache Fertigbarkeit gelegt.

Simulation der Motorspindel (hinteren Bereich)

Ergebnisse: Ausgangszustand

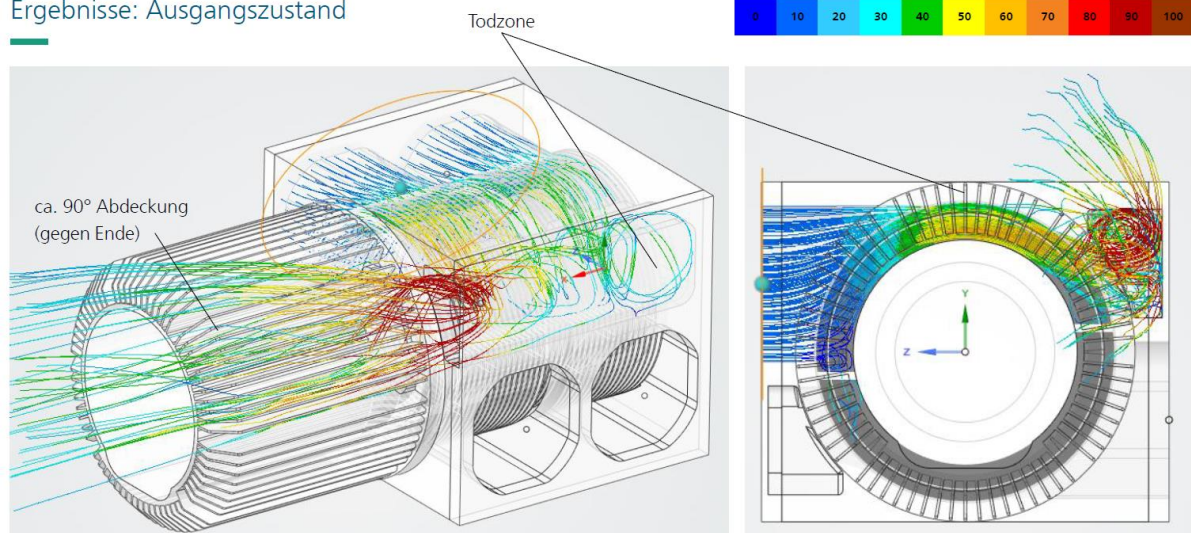


Abbildung 55: Strömungsgeschwindigkeitsverlauf von zwei Lüftern des Kühlgehäuses und des hinteren Spindelbereiches

Im ersten Ansatz wurde eine Blechumhausung gewählt, welche die maximalen Abmaße der momentanen Spindel entspricht. Dabei wurde eine Blechdicke von 5 mm gewählt und das Gehäuse in zwei spiegelbildlichen bauähnlichen Komponenten unterteilt. Die Befestigung sieht vor, die beiden Blechkomponenten auf der Stirnseite des Befestigungsrahmens der Spindel zu fixieren. Die Simulation der Blechumhausung haben gezeigt, dass die Luft einen deutlich größeren Teil der Längsrippen abdeckt (siehe **Abbildung 56**). Dennoch entstand durch den begrenzten Bauraum und geringen Restspalt zwischen Rippenspitze und Blechinnenseite eine deutliche Kompression. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Luft im überwiegenden Teil nicht zum Rippenfuß gelangt (dort herrscht die größte Temperatur).

Simulation der Motorspindel (hinteren Bereich)

Ergebnisse: Design 1

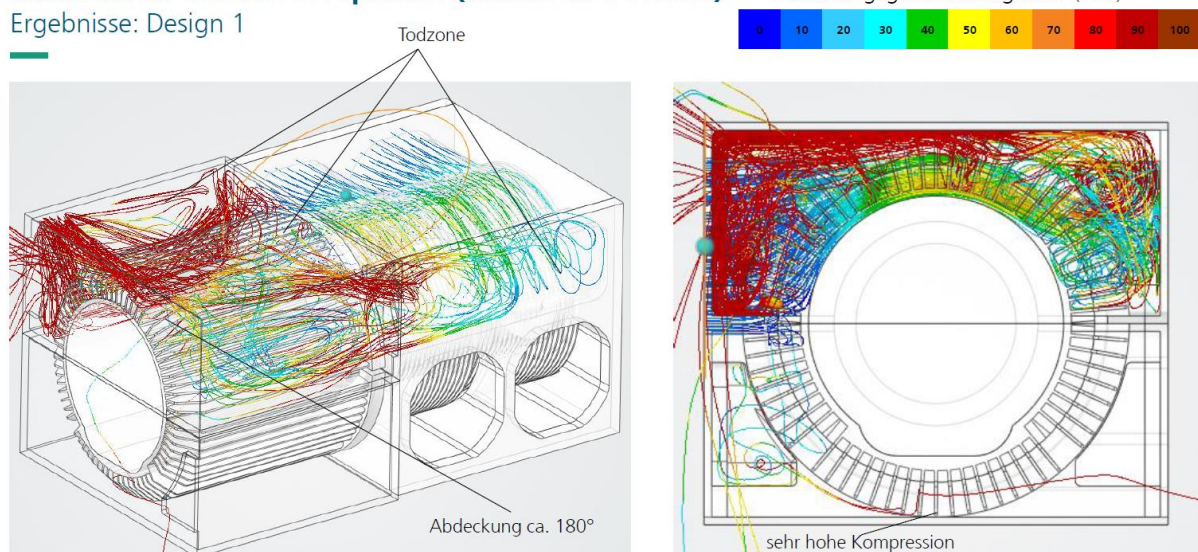


Abbildung 56: Strömungsgeschwindigkeitsverlauf von zwei Lüftern des Kühlgehäuses und des hinteren Spindelbereiches und einer zusätzlichen Blechumhausung zur Verbesserung der Kühlung im hinteren Spindelbereiches

Im weiteren Projektentwicklungsverlauf wurde die Blechumhausung verworfen und die aus dem Gehäuse austretende Kühlluft durch zwei Komponenten zur Luftführung substituiert. Um die Strömung der Kühlluft noch länger zur Kühlung nutzen zu können, wurden die zwei Luftführungselementen auf das Gehäuse aufgeschraubt (siehe **Abbildung 57**).

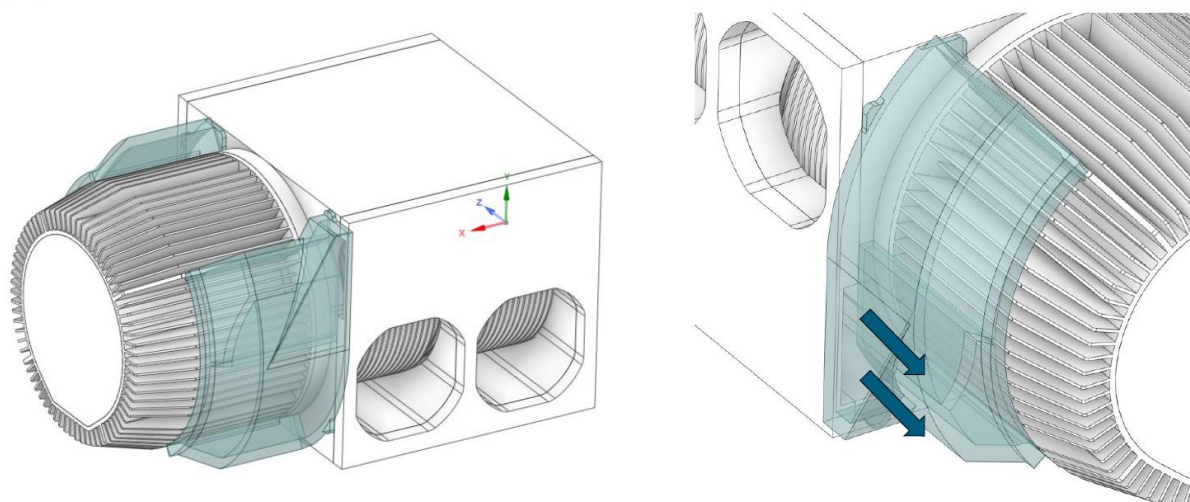


Abbildung 57: Luftführungskomponenten zur Verbesserung der Kühlung im hinteren Spindelbereich

Die Luftführung teilt den Luftstrom in 2 Teil-Luftströme auf und leitet diese dann gezielt über die Rippen des Kühlkörpers hinten. Die Ergebnisse der Simulationen zeigten, dass die Abdeckung der Kühlluft zu den Rippen ca. 95° überdeckt und der Luftstrom auch bis zu den Rippenfußpunkt gelangt (siehe **Abbildung 58**). Damit wird eine bessere Abfuhr der Wärme erwartet.

Simulation der Motorspindel (hinteren Bereich)

Ergebnisse: Design 2

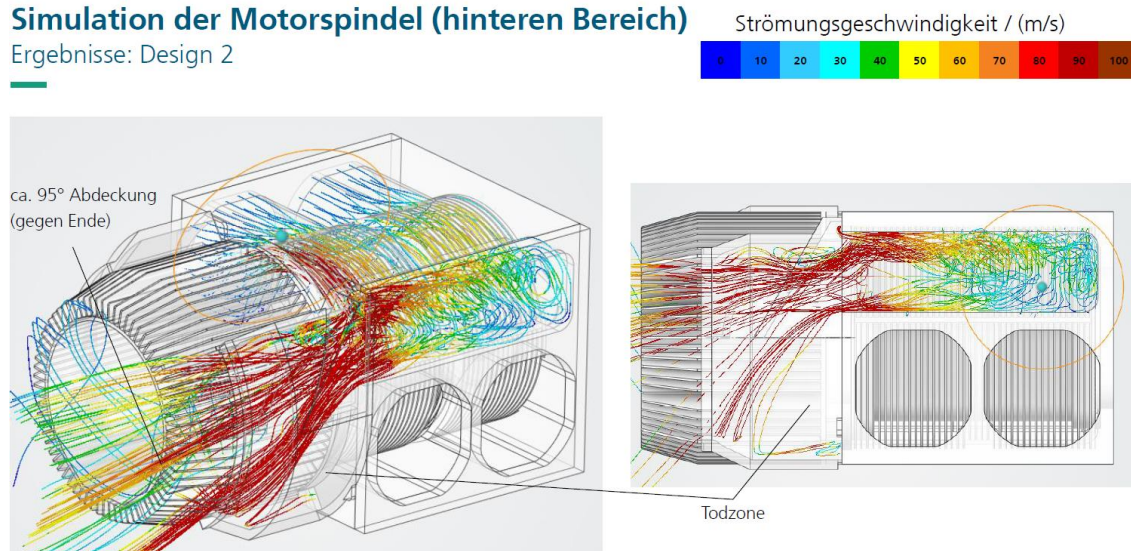


Abbildung 58: Strömungsgeschwindigkeitsverlauf von zwei Lüftern des Kühlgehäuses und des hinteren Spindelbereiches und einer zusätzlichen Luftführung zur Verbesserung der Kühlung im hinteren Spindelbereiches

Gemeinsame Arbeitsergebnisse:

Inhalt dieses Arbeitspakets war unter anderem die Erzielung einer optimalen Kühlwirkung des Kühlmantels. Radiallüfter wurden hinten an das Gehäuse angebaut. Aufgrund der Gehäuseform und der benötigten Strömungsrichtung stellten Radiallüfter hierfür einen viel-versprechenden Lösungsansatz dar. Bei der verwendeten Größe wurde mit vier Lüftern nur ein geringer Volumenstrom von $38 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht.

Bei maximal zwölf möglichen Lüftern wäre der Volumenstrom dann $114 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Baugröße der Radiallüfter wurde in Variante „V4.4.4: Kühlung mit Radiallüfter“ (siehe **Abbildung 59** links) vergrößert. Dadurch konnten diese nicht mehr hinten am Gehäuse angebracht werden, sondern wurden seitlich in den Kühlmantel versenkt. Mit vier Lüftern war ein Volumenstrom von $84 \text{ m}^3/\text{h}$ möglich. Bei maximal acht möglichen Lüftern wäre ein Volumenstrom von $168 \text{ m}^3/\text{h}$ realisierbar. Alternativ konnten kleine Axiallüfter der Abmessung $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ in das Gehäuse integriert werden. Bei zehn Axiallüftern (zwei Reihen mit je fünf Lüftern) betrug der Volumenstrom $46 \text{ m}^3/\text{h}$. Maximal möglich wären 80 Axiallüfter (Unterseite: sechs Reihen à fünf Lüfter; Seite links und rechts: je eine Reihe à fünf Lüfter) mit einem Gesamtvolumenstrom von $368 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die Abmessungen der Axiallüfter wurden in Variante „V4.4.3: Kühlung mit Axiallüfter“ (siehe **Abbildung 59** rechts) auf $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ vergrößert. Dabei war bei zwölf dieser Axiallüfter ein Volumenstrom von $528 \text{ m}^3/\text{h}$ erreichbar.

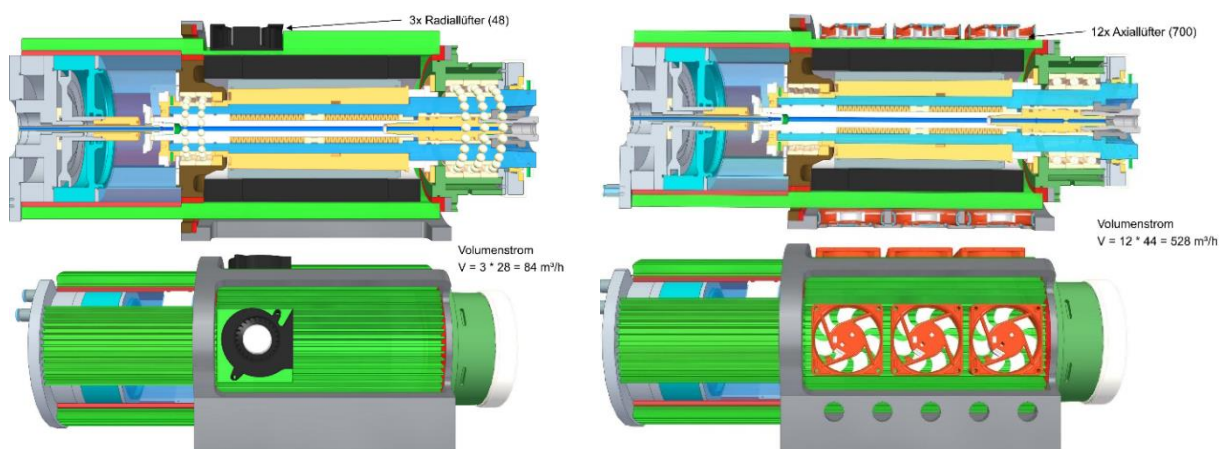


Abbildung 59: V4.4.4: Kühlung mit Radiallüfter (links), V4.4.3: Kühlung mit Axiallüfter (rechts)

Beim bisher favorisierten Stand des Kühlkörpers verliefen die Kühlrippen radial nach außen und entlang der Spindel nach hinten. Dabei konnte die Form, die Höhe und Kontur der Rippen gemäß Simulationsergebnissen angepasst werden, um eine optimale Abgabe der Wärme-Energie an die Kühlluft zu erzielen. Die Vergrößerung der Kühloberfläche um den Faktor von ca. 6,5 (bei einem Außendurchmesser von 190 mm) bis 23,7 (bei 250 mm) gegenüber der „V0: Ist-Stand“ war dabei möglich. Angedacht war, die für die Kühlung notwendigen Lüfter am Ende der Spindel anzubauen und die Kühlluft entlang der Rippen nach vorne zu blasen. Die maximale Wärme entstand im vorderen Bereich der Spindel, an der Wicklung des Motors.

In „V3b: Kühlmantel Zylinder radial“ (siehe **Abbildung 60** links) ist zu sehen, dass alternativ zu den entlang der Spindel verlaufenden Rippen diese auch radial nach außen, aber scheibenförmig verlaufen konnten. Dabei wäre eine Vergrößerung der Kühloberfläche um den Faktor von ca. 9,3 (bei 190 mm) bis 29,5 (bei 250 mm) gegenüber der „V0: Ist-Stand“ möglich gewesen.

Eine Zwischenstufe zwischen entlang der Spindel und scheibenförmig verlaufenden Kühlrippen stellte der diagonale Verlauf der Kühlrippen unter einem Winkel von 45° dar, illustriert in „V3c: Kühlmantel Zylinder diagonal“ (siehe **Abbildung 60** rechts). Die Vergrößerung der Kühloberfläche wäre um den Faktor von ca. 10,6 (bei 190 mm) bis 28,2 (bei 250 mm) gegenüber der „V0: Ist-Stand“ möglich gewesen.

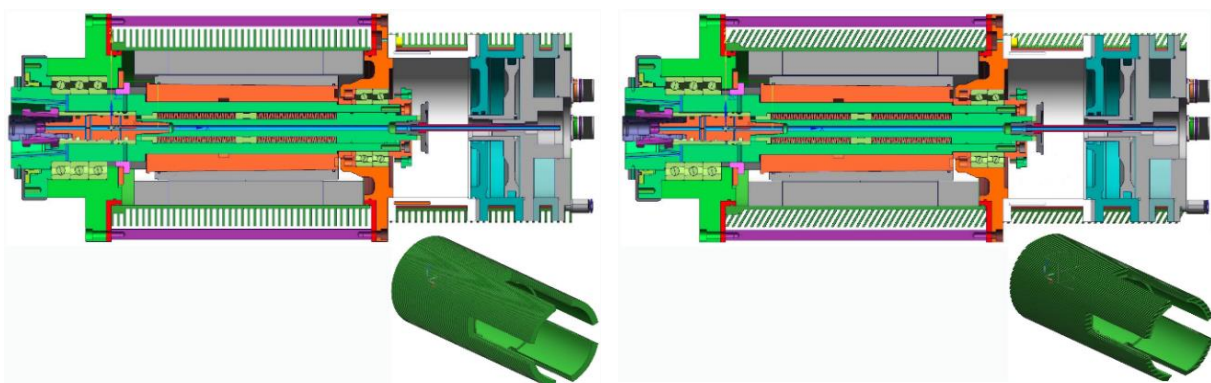


Abbildung 60: V3b: Kühlmantel Zylinder radial (link), V3c: Kühlmantel Zylinder diagonal (rechts)

Um einen glatten Kühlmantel ohne innere Stufen zu erhalten, wurde der Durchmesser des Pneumatikzylinders gegenüber dem Ist-Stand von 160 mm auf 135 mm reduziert. Dies war für die Varianten mit Längsrippen wichtig, da die von hinten eingeblasene Kühlluft, die von einem oder mehreren Lüftern erzeugt wurde, ungehindert ohne Absätze nach vorne strömen konnte und damit die maximale Kühlwirkung erzielt wurde. Die Reduzierung des Durchmessers musste jedoch durch weitere technische Maßnahmen kompensiert werden, z.B. durch Erhöhung des Drucks der Pneumatik oder Verwendung eines Tandem-Zylinders. Bei diesen zusätzlichen technischen Maßnahmen, die die Herstellungskosten der Spindel erhöhten, wäre es besser gewesen, wenn sie nicht notwendig gewesen wären. Falls die radial verlaufenden Kühlrippen (Scheiben) verwendet wurden, bot sich die Möglichkeit, auf den Durchmesser von 160 mm des Pneumatikzylinders zurück-zu-kehren. So wie in „V3b: Kühlmantel Zylinder radial SPZ 160“ (siehe **Abbildung 61**) zu sehen, erhielt der Kühlmantel eine Stufe nach außen im Bereich vor dem Pneumatikzylinder. Die Kühlrippen wurden in der Höhe nicht reduziert, sondern nur weiter nach außen gesetzt, wodurch sich die Kühlwirkung auf einem ähnlichen Niveau wie bei einem geraden Kühlmantel ohne Absatz befinden sollte.

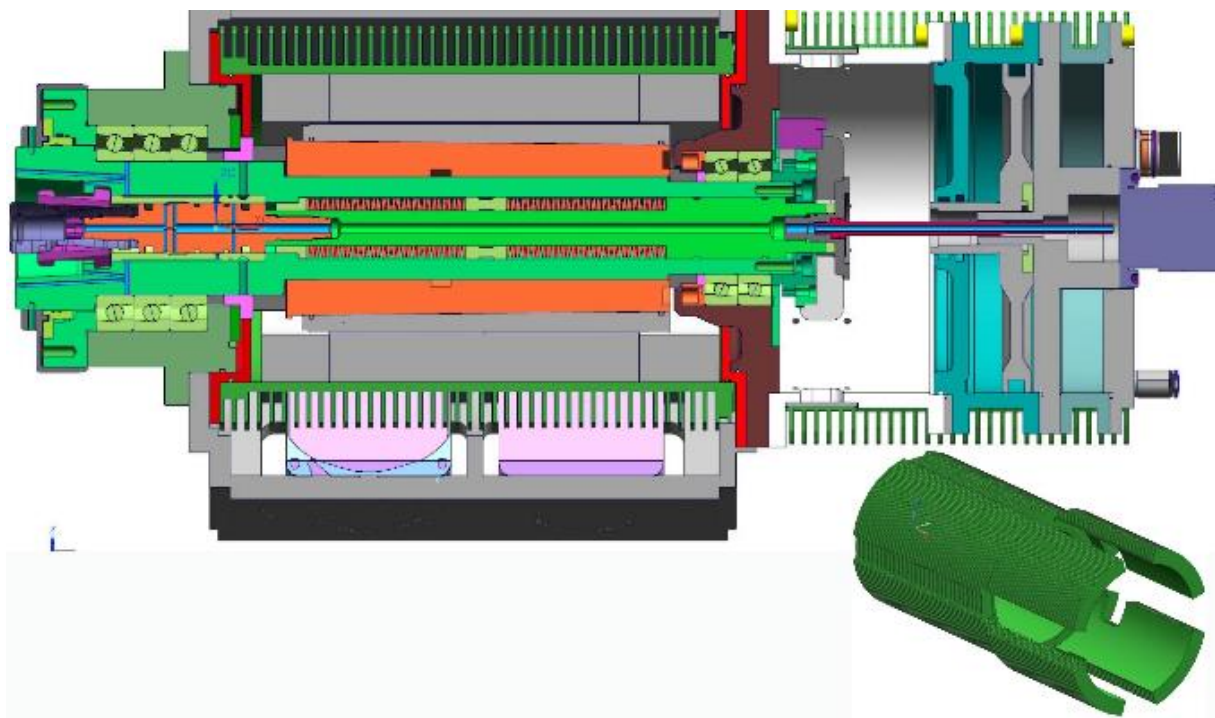


Abbildung 61: V3b: Kühlmantel Zylinder radial SPZ 160

Bei Anwendung der radial verlaufenden Kühlrippen (Scheiben) wurde bisher ein 3D-gedrucktes Gehäuse verwendet, siehe „V4: Gehäuse Lüfter 80 Mantel“ (siehe **Abbildung 62** links). Wenn zur Luftführung dann der innere Mantel verwendet wurde, könnte das Gehäuse, wie in „V4: Gehäuse Lüfter 80 Schweißteil“ (siehe **Abbildung 62** rechts) dargestellt, auch konventionell als Schweißteil hergestellt werden. Beim Gehäuse sollte aus Gründen von Steifigkeit und thermischer Stabilität das verwendete Material nicht Aluminium sein, sondern eine Stahllegierung, wodurch der 3D-Druck auch teurer und aufwendiger wurde.

Zur Herstellung des Kühlmantels mit einer Länge von ca. 440 mm musste dieser so angepasst werden, dass er auch mit den bei der Hochschule Aalen zur Verfügung stehenden 3D-Druckern hergestellt werden konnte. Die Limitierung war dabei der Bauraum mit der Grundfläche von 250 mm x 250 mm und einer Bauhöhe von ebenfalls 250 mm. Angedacht war, den Kühlmantel wie ein stehendes Rohr auf Grundfläche zu drucken.

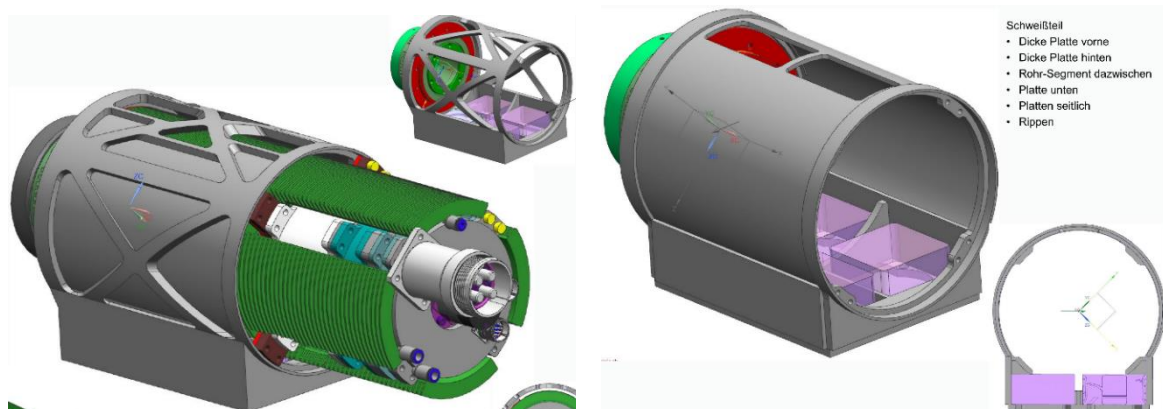


Abbildung 62: V4: Gehäuse Lüfter 80 mm Mantel (links), V4: Gehäuse Lüfter 80 mm Schweißteil

In „V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160“ (siehe **Abbildung 63** links) und „V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160 (2)“ (siehe **Abbildung 63** rechts) ist zu sehen, wie der Kühlmantel in zwei Einzelteile aufgeteilt wurde, mit einer innenliegenden Schrauben-Schnittstelle. Die Schrauben sind nur bei der Erstmontage zugänglich, im weiteren Betrieb jedoch nicht.

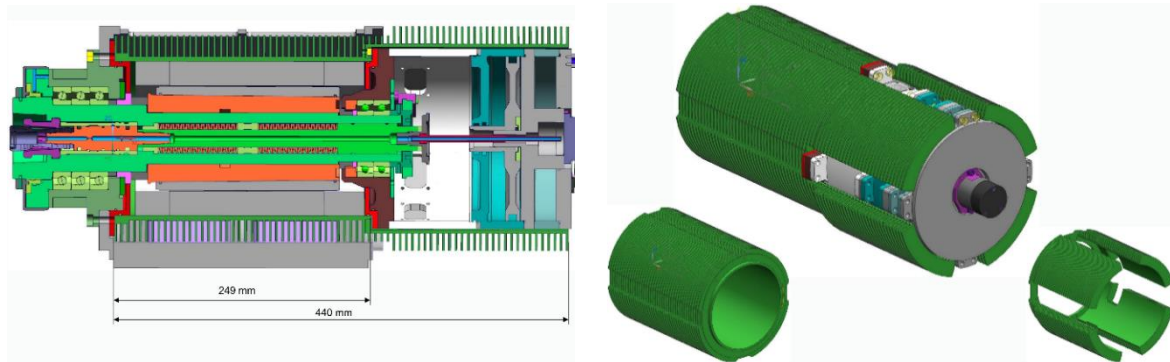


Abbildung 63: V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160 (links), V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160 (2)

Weiterhin ist zu erkennen, dass im derzeitigen Stand der hintere Abschnitt unförmig, schwer herzustellen und zu handhaben ist. Zur besseren Zugänglichkeit der Schraubenschnittstelle wurde diese nach außen gelegt, wie in „V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2“ (siehe **Abbildung 64** links) und „V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (2)“ (siehe **Abbildung 64** rechts) zu erkennen ist. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, den hinteren Teil des Kühlmantels (Teil 2) so zu gestalten, dass dieser als letztes Teil montiert werden kann. So kann er dann auch zu jedem Zeitpunkt demontiert und wieder montiert werden, wobei die Schrauben noch nicht optimal zugänglich sind. Nebenbei hat sich dadurch die Herstellbarkeit verbessert.

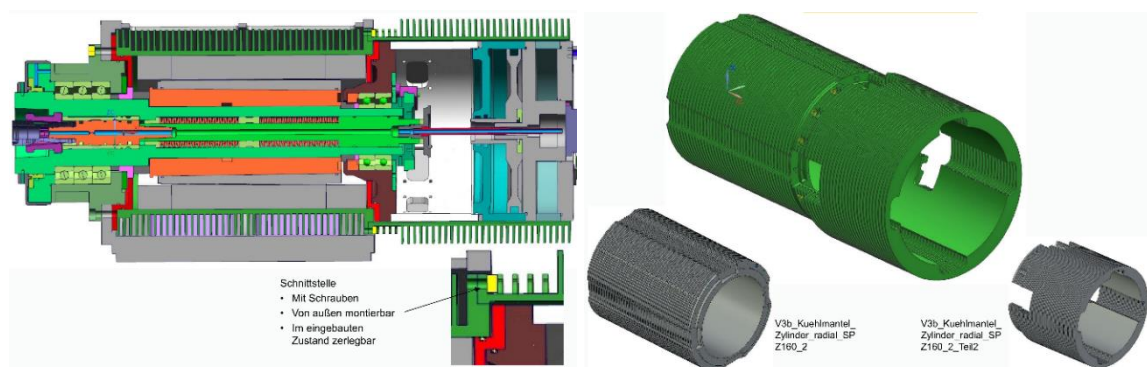


Abbildung 64: V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (links), V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (2) (rechts)

Abbildung 65 links („V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (3)“) zeigt den hinteren Abschnitt (Teil 2) des Kühlmantels im montierten Zustand, **Abbildung 65** rechts („V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (4)“) im demontierten Zustand. Im

demontierten Zustand des Hinterteils (Teil 2) wäre die Zugänglichkeit zum hinteren Spindelteil, in dem sich unter anderem der Zahnradgeber oder die Abfrage der Spannstellung bei Montage, Wartung und Reparatur befindet, gleich gut wie bei „V0: Ist-Stand“. Da bei dieser Ausführung Teil 2 als letztes montiert wird, ist es auch möglich, die Rippen bei Teil 2 größtenteils in Umfangsrichtung zu schließen, im Bereich der vier Laschen zur Befestigung des hinteren Lagerflansches. Für die Fertigung und Handhabung hat dies einen positiven Nebeneffekt, ebenso erhöht sich dadurch auch die Kühloberfläche.

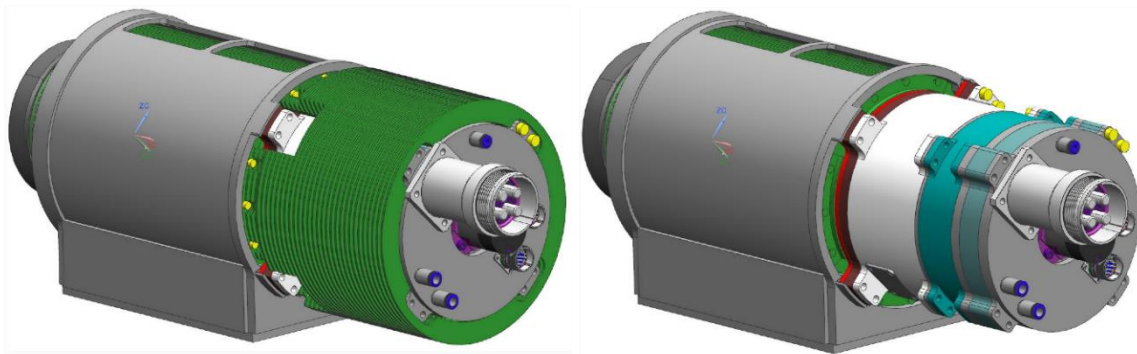


Abbildung 65: V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (3) (links), V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (4) (rechts)

Darüber hinaus bietet dieses Konzept eine Möglichkeit der Skalierung. Das Hinterteil (Teil 2) des Kühlkörpers kann eine Option sein und muss nicht immer montiert werden. In „V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (5)“ (siehe **Abbildung 66**) wird eine weitere Möglichkeit der Skalierbarkeit gezeigt. Optional kann auch über den hinteren Teil des Kühlkörpers (Teil 2) ein zusätzliches Kühlgehäuse montiert werden, das in der Ausführung einfacher sein kann als das Gehäuse (z.B. Blech-Biege-Konstruktion). Darin können dann im unteren Bereich analog zum Gehäuse auch Lüfter Platz finden und Teil 2 aktiv kühlen.

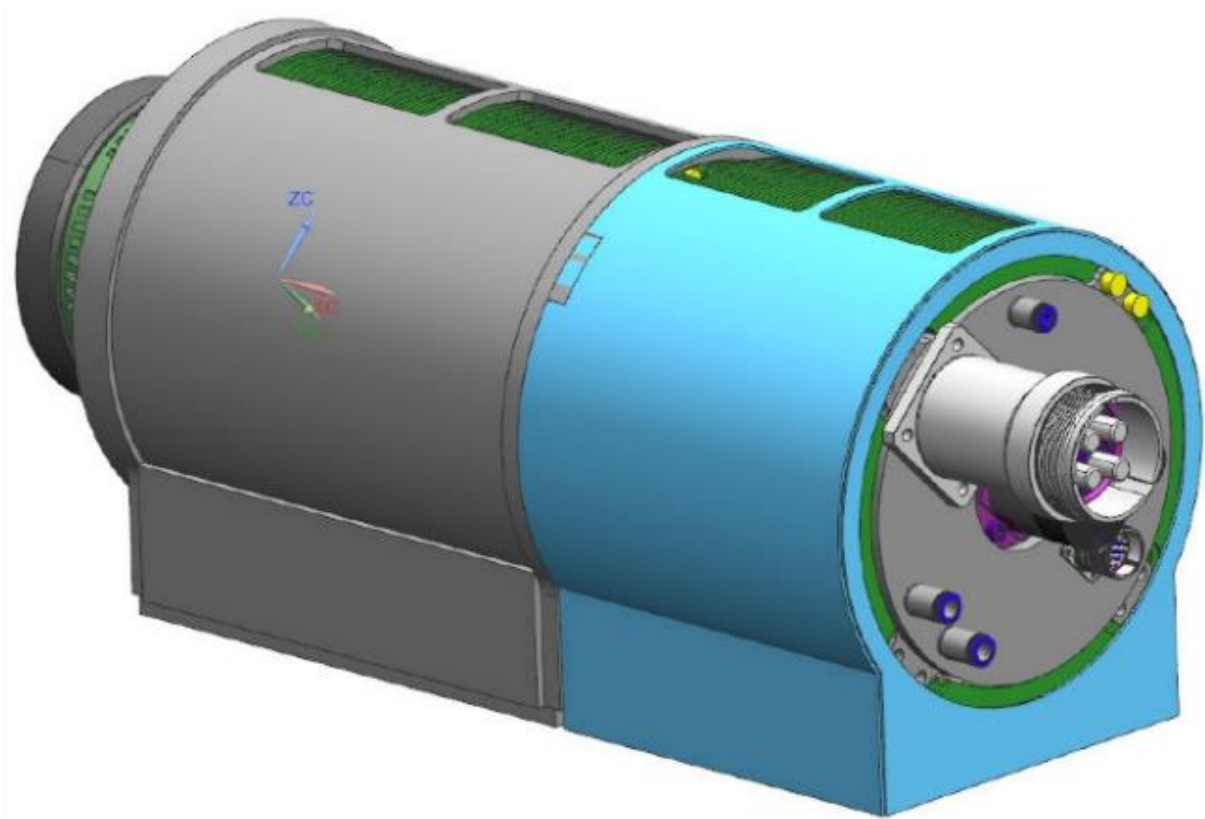


Abbildung 66: V3b: Kühlmantel Zylinder radial 2-teilig SPZ 160-2 (5)

3.8 AP9: Entwurf Lüfterkonzept

Als Voraussetzung für den Einsatz additiver Fertigungsverfahren wurde ein Konzept zur Erzeugung eines erforderlichen Volumenstroms mit optimaler Strömungsgeschwindigkeit über den gezielten, dezentralen Einsatz mehrerer, direkt in den Kühlmantel oder in das Spindelgehäuse, integrierter kleiner Lüfter, durch Nutzung numerischer Simulationswerkzeuge, entwickelt. Weiterhin wurde ein standardisierter Lüfter-Bausatz konzipiert. Dieser soll den für den Wärmetransport benötigten Luftdurchsatz mittels eines im optimalen Arbeitspunkt betriebenen Lüfters, abgestimmt auf den spezifischen Wärmelastanfall, innerhalb der Kühlluftführung gewährleisten. Weiter sollen die Lüfter durch konstruktive Skalierung in unterschiedlichen Bereichen der Spindel eingesetzt werden können. Die Art (axial und/oder radial) und Baugröße des Lüfters sowie die Anordnung in Serie- oder Parallelschaltung, die Positionierung und die Anzahl der Lüfter sind hierbei zu untersuchende Vorgaben. Reckerth und Roschiwal überführen das entwickelte Konzept der Lüfter in das bestehende Leichtbau-Spindel-Konzept und Kühlmantel-Konzept. Des Weiteren sind zuverlässige Antriebe der Lüfter durch hochwertige und energieminimalen Kleinmotoren in das Spindelkonzept oder in den Kühlmantel zu integrieren, die sich in einem wirtschaftlichen und ökonomischen Kostenrahmen befinden.

Gemeinsame Arbeitsergebnisse:

Ziel war der Entwurf eines Lüfterkonzepts sowie die Integration in das Leichtbau-Konzept des Spindelgehäuses und des Kühlmantels. Die Kühlluft sollte in den vorderen Bereich der Spindel an die Wicklung des Motors geleitet werden. Mit Axiallüftern der Abmessungen 60 mm x 60 mm x 32 mm kann ein Volumenstrom von ca. 246 m³/h oder 328 m³/h (bei 3 oder 4 Lüftern) erreicht werden. Für einen höheren Kühlluft-Volumenstrom sind größere Axiallüfter der Abmessungen 80 mm x 80 mm x 38 mm erforderlich, die einen Volumenstrom von ungefähr 666 m³/h oder 888 m³/h (bei 3 oder 4 Lüftern) ermöglichen.

Die Ausströmung der Kühlluft kann über ein Raster aus linearen Bohrungen oder Schlitzten erfolgen, wobei diese Öffnungen strömungstechnisch simuliert und angepasst werden sollten. Die Rohre mit den Ausströmungsöffnungen können aufgrund der additiven Fertigung direkt mitgedruckt werden, was sowohl die Kosten als auch die Gestaltung positiv

beeinflusst. Zudem besteht die Möglichkeit, jeden Lüfter mit einem eigenen Ansaugstutzen zu versehen oder diese zusammenzufassen, um eine zentrale Ansaugung zu realisieren. Das Gehäuse kann so gestaltet werden, dass darin Axiallüfter Platz finden, die einen Volumenstrom von ca. 492 m³/h (bei 6 Lüftern) ermöglichen. Zur gezielten Luftführung können seitlich auf das Gehäuse Leitbleche aufgesetzt werden, während der obere Bereich offenbleibt, um die erwärmte Kühlluft nach oben ausströmen zu lassen. Um Verwirbelungen und Strömungsverluste zu minimieren, wurden die Leitbleche durch einen in das Gehäuse integrierten Kühlmantel ersetzt, der auch die Steifigkeit des Gehäuses erhöht.

Zur Erhöhung des Volumenstroms wurden die Axiallüfter der Abmessungen 60 mm x 60 mm x 32 mm durch größere Lüfter ersetzt, was einen Volumenstrom von ca. 888 m³/h ermöglicht. Die Spitzenhöhe des Gehäuses muss um 10 mm erhöht werden, um Platz für die größeren Lüfter zu schaffen. Eine Luftzuführung zur Versorgung der Lüfter mit frischer und kalter Ansaugluft sollte an der Anschraubschnittstelle des Gehäuses zur Maschine vorhanden sein. Falls dies nicht möglich ist, wird eine zusätzliche Zwischenplatte mit Ansaugstutzen benötigt.

Die Motorspindel kann entweder als Blockspindel mit der unteren Schnittstelle am Gehäuse oder als Flanschspindel mit einem zusätzlichen Flansch, der an die Maschine geschraubt wird, ausgeführt werden. Der Ansaugtrichter kann direkt oder über einen Stutzen zur Luftzuführung angebracht werden, wobei bei Bedarf auch mehrere kleinere Ansaugstutzen verwendet werden können, um in der Höhe Bauraum zu sparen.

Abbildung 67 stellt die einzelnen Designstufen zum Erreichen eines idealen Lüfterkonzepts der Leichtbau-Motorspindel dar.

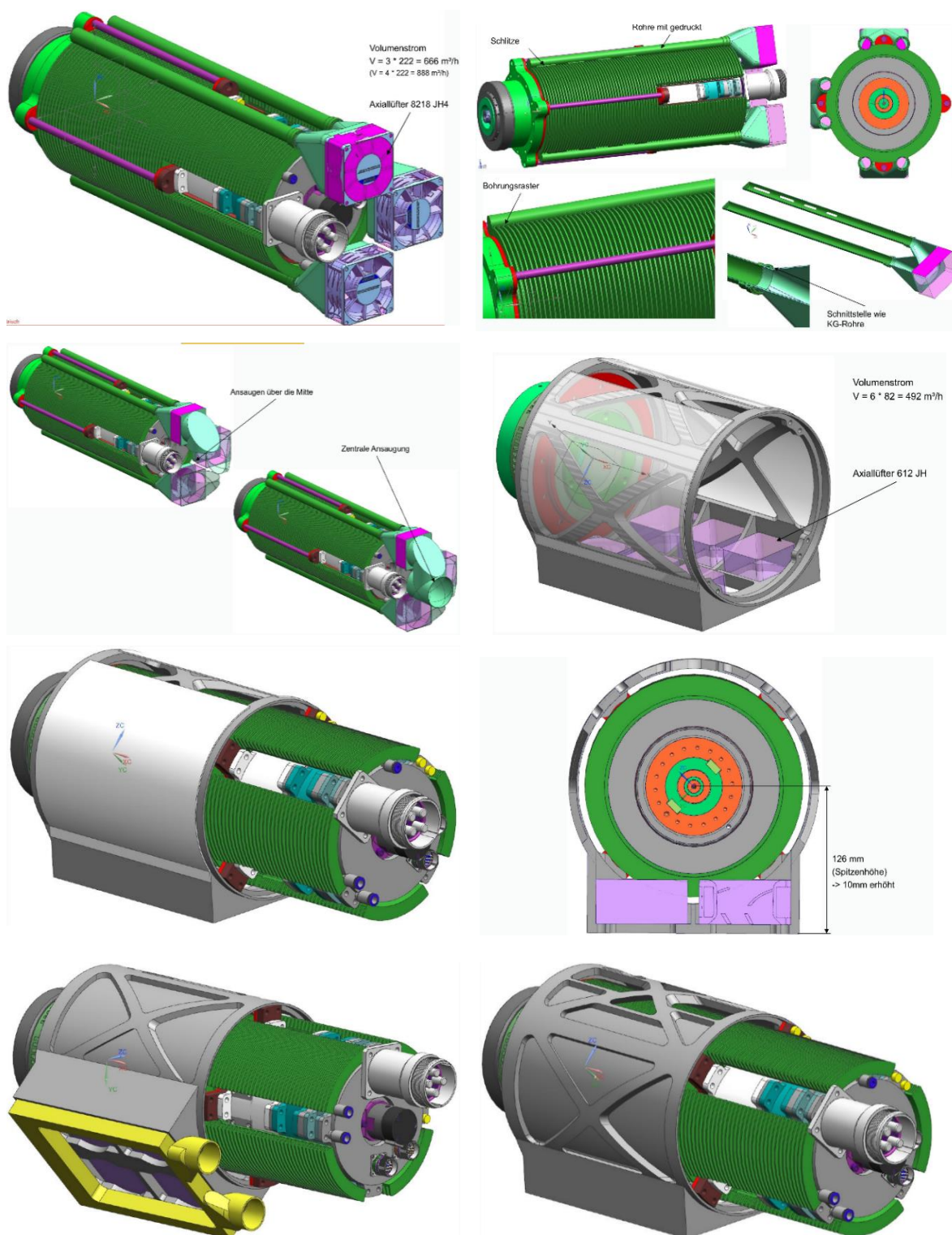


Abbildung 67: einzelne Designstufen zum Erreichen eines idealen Lüfter-konzeptes der Leichtbau-Motorspindel

3.9 AP10: Detailierung und Ausarbeitung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets (AP) wurden die Entwürfe der einzelnen Teilkonzepte von Roschiwal und Reckerth detailliert ausgearbeitet und in einen Gesamtentwurf überführt. Das **Fraunhofer IPA** begleitete das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten und optimierte es gegebenenfalls durch konstruktionsbegleitende Berechnungen. Die Hochschule Aalen unterstützte als assoziierter Partner und erteilte wertvolle Hilfestellung. Zum Abschluss des AP sollten Fertigungszeichnungen, Modelle für die additive Fertigung sowie Montageanleitungen des Gesamtkonzepts vorliegen.

Mit dem Abschluss von Arbeitspaket 10 wurde der **fünfte Meilenstein** erreicht, der die Fertigstellung der Zusammenführung und Ausdetaillierung des Gesamtsystems sowie die Ableitung von Fertigungszeichnungen, Modellen und Montageanleitungen für das Gesamtkonzept umfasste.

Gemeinsame Arbeitsergebnisse:

Ziel war die Integration der Einzelentwürfe zu einem Gesamtsystem sowie die Ableitung von Fertigungszeichnungen und Montageanleitungen. Der Kühlmantel wurde in zwei Teile unterteilt, um die Herstellung und Montage zu erleichtern. Der primäre Kühlkörper mit radialen Rippen ist im Gehäuse untergebracht und von außen nur durch die beiden unteren Schlitze sichtbar. Der hintere Kühlkörper mit Längsrippen ist ebenfalls sichtbar und thermisch vom primären Kühlkörper entkoppelt, um eine optimale Wärmeabfuhr zu gewährleisten.

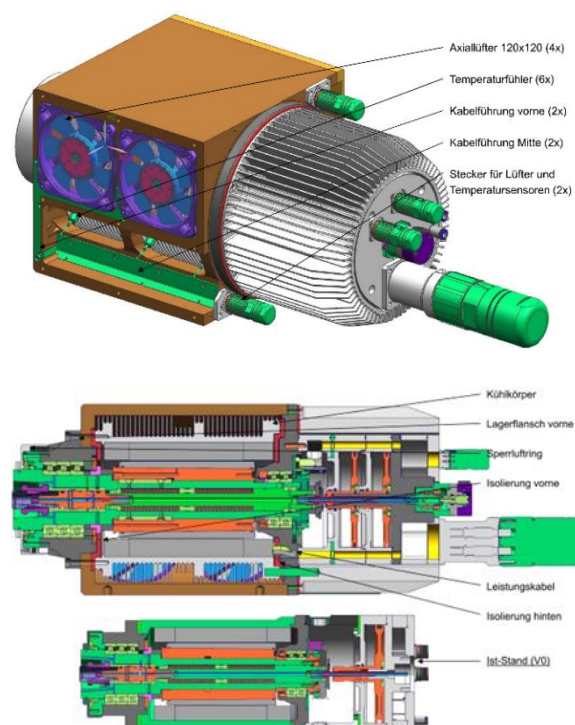


Abbildung 68: einzelne Designstufen der Leichtbau-Motorspindel

In der Konstruktion wurden die Kühlrippen so gestaltet, dass sie eine effektive Wärmeabgabe an die Kühlluft ermöglichen. Die Rippenkontur wurde gemäß den Vorgaben festgelegt, wobei die Breite, Höhe und der Abstand der Rippen auf spezifische Werte optimiert wurden (siehe **Abbildung 69**). Die gesamte Kühloberfläche beträgt nun $1,94 \text{ m}^2$, was der 14-fachen Oberfläche der Referenz-Motorspindel entspricht.

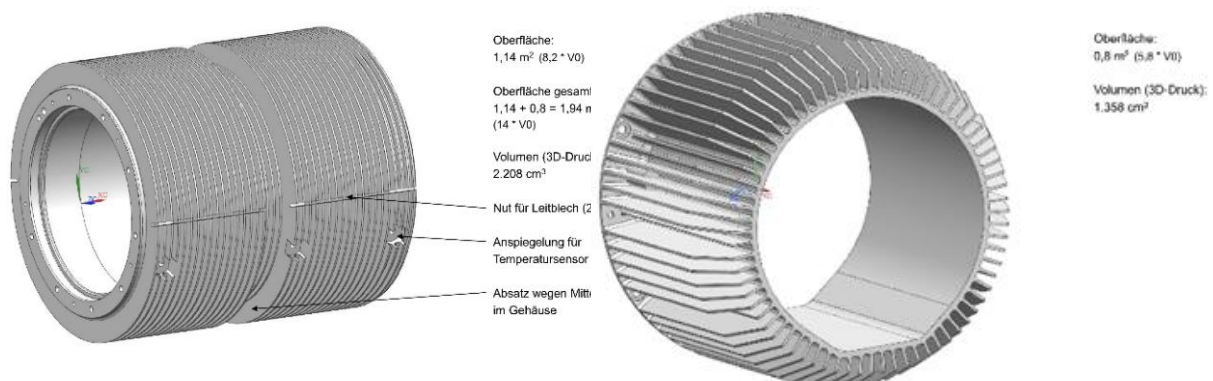


Abbildung 69: primärer Kühlkörper (links) und Kühlkörper für hintere Spindeleinheit (rechts)

Die Leichtbau-Motorspindel als Gesamtentwurf ist in **Abbildung 70** dargestellt. Zur Erzeugung des Kühlluftvolumenstroms werden vier Axiallüfter vom Typ 4414FN/39H der Firma Ebm-Papst mit den Abmessungen $119 \text{ mm} \times 119 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ eingesetzt. Jeder dieser Lüfter erzeugt einen maximalen Volumenstrom von $225 \text{ m}^3/\text{h}$, sodass alle vier Lüfter im optimalen Fall zusammen einen Volumenstrom von $900 \text{ m}^3/\text{h}$ erreichen. Dieser Wert entspricht den erarbeiteten Erkenntnissen und Festlegungen des Fraunhofer IPA. Die Lüfter arbeiten mit einer Drehzahl von 5.400 U/min und haben einen Schalldruckpegel von 55 dB(A) .

Im Vergleich dazu hatten die ursprünglich angedachten Lüfter vom Typ 8218JH4 der Firma Ebm-Papst die Abmessungen $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 38 \text{ mm}$, erzeugten einen Volumenstrom von $222 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Drehzahl von 14.000 U/min und wiesen einen Schalldruckpegel von 71 dB(A) auf. Durch den Einsatz der Axiallüfter 4414FN/39H wird die emittierte Lautstärke signifikant reduziert, während der Volumenstrom konstant bleibt. Die Axiallüfter 4414FN/39H werden mit einer Nenn-Gleichspannung von 24 V-DC betrieben, da diese kurzfristig lieferbar sind, im Gegensatz zu den Varianten 4412FNH mit einer Spannung von 12 V-DC .

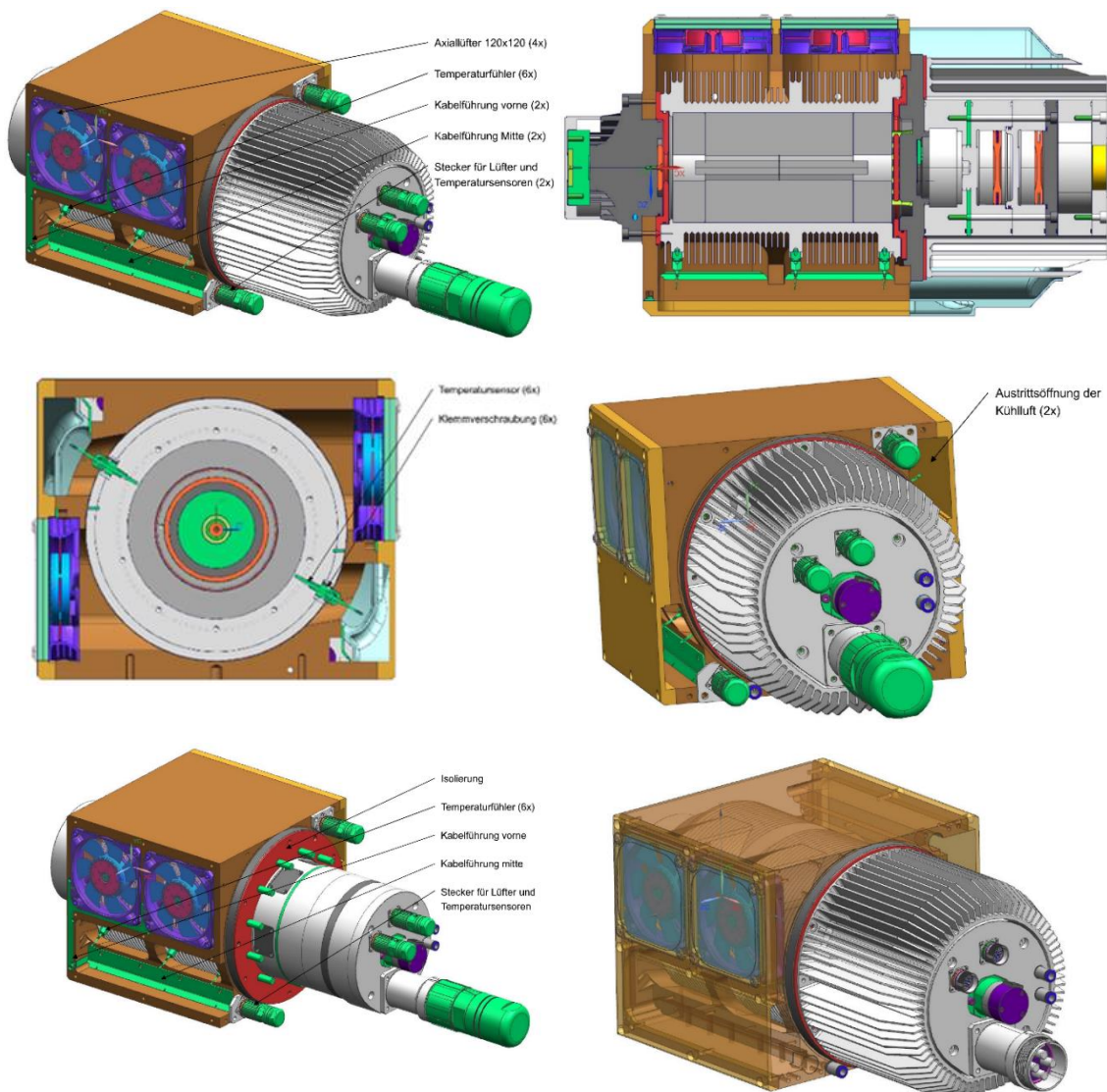


Abbildung 70: Darstellung einzelner Designs der Leichtbau-Motorspindel

Um Verwirbelungen und Strömungsverluste zu minimieren, wurde die Kühlluftführung so gestaltet, dass sie die Kühlkörper im hinteren Bereich gezielt erreicht (siehe **Abbildung 71**). Die Konstruktion umfasst auch eine Möglichkeit zur Integration von Temperatursensoren in den Lagerflanschen, die eine präzise Überwachung der Temperaturen ermöglichen. Diese Sensoren sind in Klemmverschraubungen untergebracht, um einen einfachen Austausch zu gewährleisten. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Tandem-Lösezyylinder, der aus zwei hintereinander liegenden Kolben besteht und die erforderliche Lösekraft bei reduziertem Außendurchmesser gewährleistet. Dies ermöglicht eine kompakte Bauweise, ohne die Funktionalität zu beeinträchtigen.

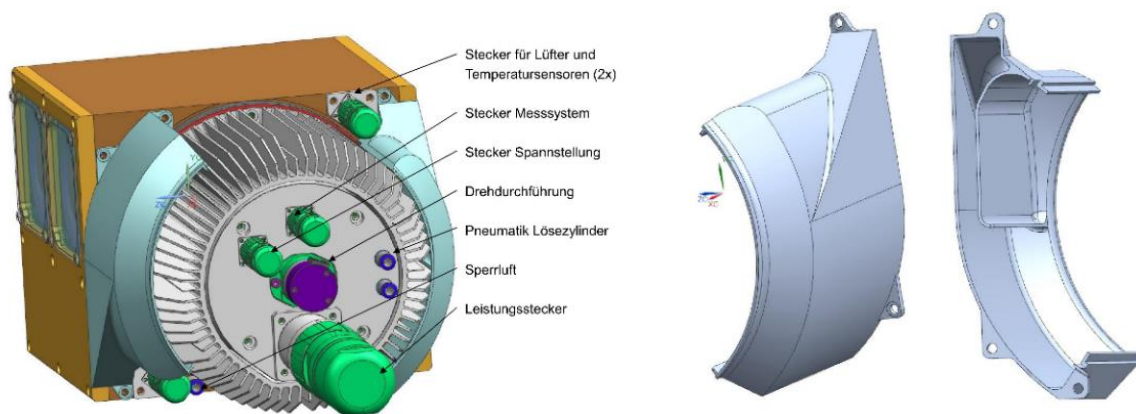


Abbildung 71: Darstellung der Luftführung für die hintere Kühleinheit

Die Zeichnungsableitungen für alle Einzelteile und Unterbaugruppen wurden erstellt, einschließlich aller Ansichten, Schnitte, Bemaßungen und Oberflächenbehandlungen. Die Modelle der Einzelteile wurden in sinnvolle Unterbaugruppen bezüglich CAD und Montage zusammengefasst. Die Stücklisten enthalten alle notwendigen Angaben für die Bestellung der Norm- und Kaufteile.

Nach der Erstellung aller Zeichnungen und Stücklisten wurde eine Funktionskontrolle durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Baugruppe montiert werden kann und ihre Funktionen erfüllt. Die Montagehinweise wurden in die Baugruppenzeichnungen integriert, um eine reibungslose Montage zu gewährleisten.

3.10 AP11: Aufbau Einzelbausteine und Gesamtsystem

Auf Basis der Ergebnisse und der Dokumentation aus den vorausgeschalteten Arbeitspaketen (AP) wurden die Einzelbausteine gefertigt. Dazu kamen klassische Herstellungsverfahren zur Nachbearbeitung sowie additive Verfahren zum Einsatz. Für die additive Fertigung wurde die Hochschule Aalen als assoziierter Partner beauftragt. Das **Fraunhofer IPA** übernahm die Spezifikation, Abstimmung und Koordination. Roschiwal überwachte die Fertigung unter energie- und ressourcenspezifischen Gesichtspunkten und untersuchte die Fertigungsstrategie insgesamt, um Schwachstellen, die durch das Konglomerat vieler Einzelkomponenten und mögliche Fertigungsschwankungen entstanden, abzubauen bzw. zu minimieren. Reckerth war verantwortlich für den Aufbau des Gesamtsystems und übernahm zusammen mit Roschiwal die Integration der Einzelbausteine. Das Arbeitspaket wurde durch die Bereitstellung eines vollwertigen Gesamtprototyps zur anschließenden Erprobung in AP12 abgerundet.

Das Arbeitspaket wurde durch die Bereitstellung eines vollwertigen Gesamtprototyps zur anschließenden Erprobung in Arbeitspaket 12 abgerundet. Arbeitspaket 11 wurde mit dem **sechsten Meilenstein**, dem Abschluss der Umsetzungsphase und der Fertigung der Einzelbausteine sowie der Zusammenfassung der Gesamtbaugruppe, abgeschlossen.

Gemeinsame Arbeitsergebnisse:

Es wurde festgestellt, dass die Motorspindel im bisherigen Konstruktionsstand nur mit erheblichem Aufwand herstellbar ist und nicht zu den Fertigungs- und Montageabläufen der Fa. Reckerth passt. Daher musste eine zusätzliche Abstimmscheibe unter dem vorderen Lagerflansch eingefügt werden. Die Zeichnungs-Ausschnitte aus der Baugruppenzeichnung der Unterbaugruppe des Gehäuses zeigen den Stand vor und nach der Änderung, wobei die Abstimmscheibe (Pos. 3) nachträglich eingefügt wurde.

Obwohl die Änderung geringfügig erscheint, mussten etwa 15 % bis 20 % der bereits fertiggestellten Einzelteile, einschließlich des Gehäuses, angepasst werden. Nach den Anpassungen wurden die Zeichnungsableitungen aktualisiert, kontrolliert und bereitgestellt.

Die Hochschule Aalen stellte die dafür ausgewählten Teile additiv her. Aufgrund der Komplexität der Einzelteile und der teilweise vorhandenen Freiformflächen erfolgte die Fertigung auf Basis der 3D-Modelle, die im STEP-Austauschformat bereitgestellt wurden. Der primäre Kühlkörper wurde liegend gedruckt, um die Druckqualität zu optimieren. Dies erforderte äußere Stützstrukturen, die im Druckprozess notwendig waren und nach dem Druck manuell oder maschinell entfernt werden mussten. **Abbildung 72** zeigt die 3d-gedruckten Bauteile der Leichtbau-Motorspindel vor der Nachbearbeitung.

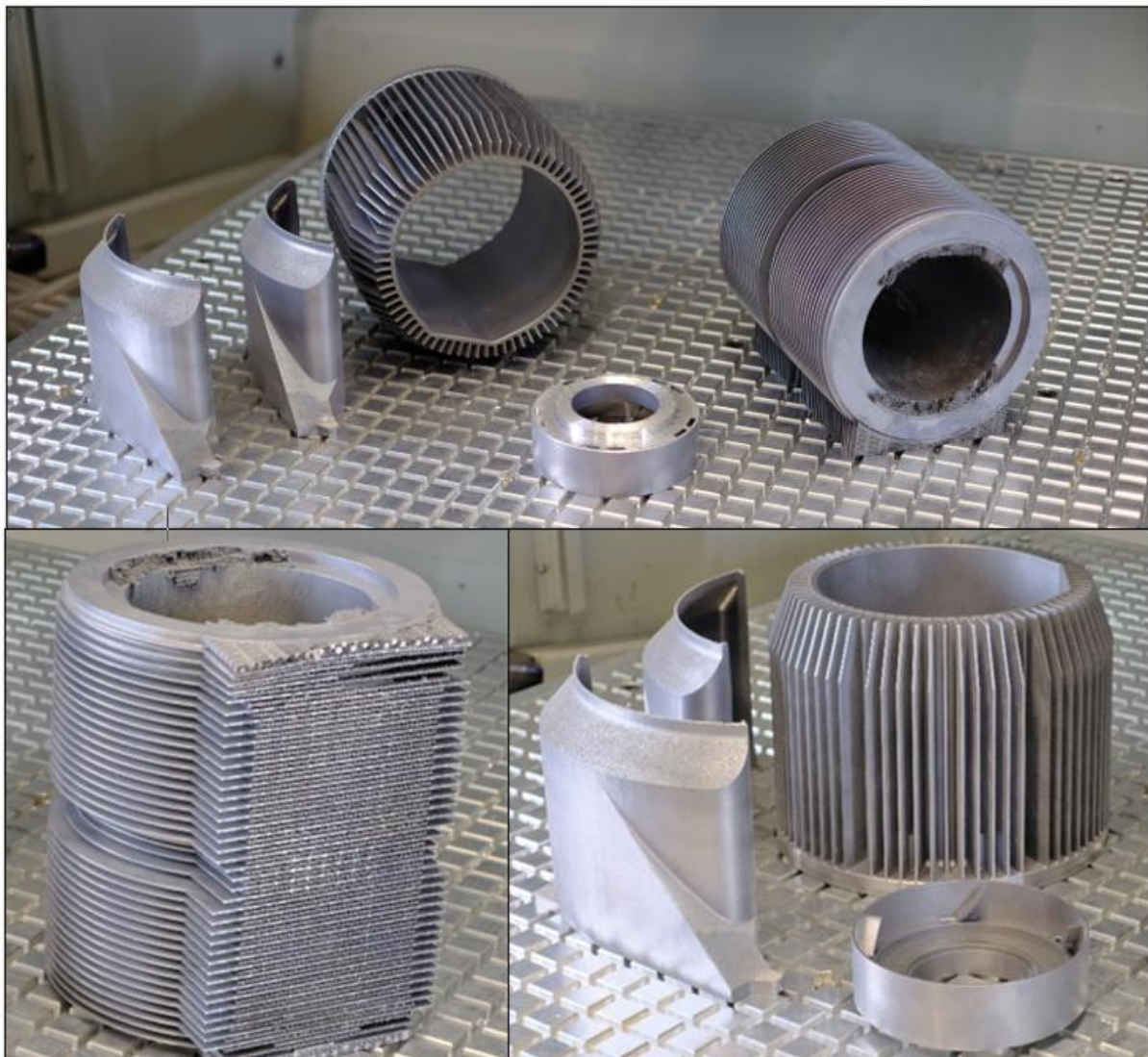


Abbildung 72: 3d-gedruckte Bauteile der Leichtbau-Motorspindel

Die 3D-gedruckten Rohteile wurden anschließend nach den erstellten Zeichnungen nachbearbeitet. Alle Fertigungsteile wurden gemäß den Zeichnungen hergestellt, und die

Kaufteile wurden anhand der Stückliste beschafft. Die Einzelteile und Kaufteile wurden dann gemäß den Baugruppenzeichnungen zu den Unterbaugruppen und schließlich zur gesamten Leichtbau-Motorspindel zusammengefügt.

Der fertig montierte Zustand der Leichtbau-Motorspindel wurde dokumentiert, und nach dem mechanischen Zusammenbau erfolgte die elektrische und pneumatische Installation. Die 3D-gedruckten Rohteile wurden anschließend nach den erstellten Zeichnungen nachbearbeitet. Alle Fertigungsteile wurden gemäß den Zeichnungen hergestellt, und die Kaufteile wurden anhand der Stückliste beschafft. Die Einzelteile und Kaufteile wurden dann gemäß den Baugruppenzeichnungen zu den Unterbaugruppen und schließlich zur gesamten Motorspindel zusammengefügt.

Abbildung 73 zeigt die fertige Leichtbau-Motorspindel, die in nachfolgende experimentelle Untersuchungen an einen Industrieroboter thermisch untersucht werden soll.

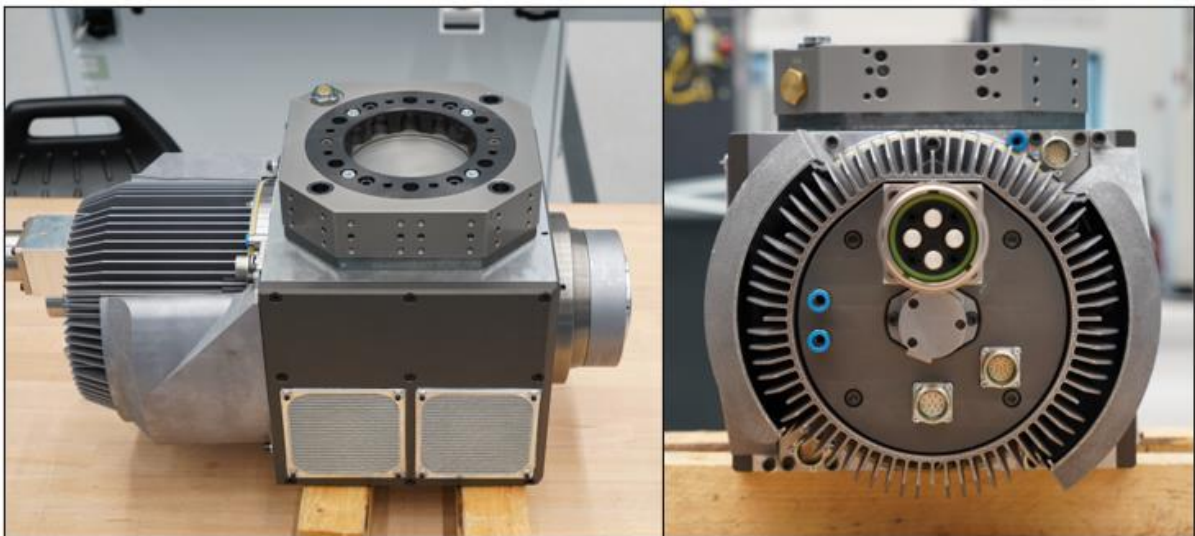


Abbildung 73: Leichtbau-Motorspindel

3.11 AP12: Test, Validierung und Optimierung Gesamtsystem

Ziel war die Untersuchung und Optimierung der Einzelkomponenten sowie des Gesamtsystems. Zunächst überprüfte Reckerth die Gesamtbaugruppe auf ihre Funktionalität. Das **Fraunhofer IPA** führte bei Erfüllung der Funktionalität experimentelle Untersuchungen zur Gewährleistung der Prozesssicherheit unter praxisnahen Bedingungen durch, wertete diese aus und verglich die Ergebnisse mit einem Referenzmodell. Die gewonnenen Ergebnisse dienten als Grundlage für Optimierungsansätze in einer weiteren Iterationsschleife der eingebrachten Komponenten.

Die Optimierung der einzelnen Komponenten wurden entsprechend den aufgeführten Schwerpunkten der Projektpartner aufgeteilt

Gemeinsame Arbeitsergebnisse:

Zur Vorbereitung der Tests und zur Validierung der Leichtbau-Motorspindel unter praxisnahen Einsatzbedingungen wurde im Konsortium beschlossen, dass der Demonstrator am institutseigenen Industrieroboter des Fraunhofer IPA betrieben werden soll. Dazu wurde eine konstruktive Anpassung des Befestigungsgehäuses mittels eines Wechselsystems vorgenommen, um eine nahtlose Integration der Motorspindel am Roboter zu gewährleisten (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** links).

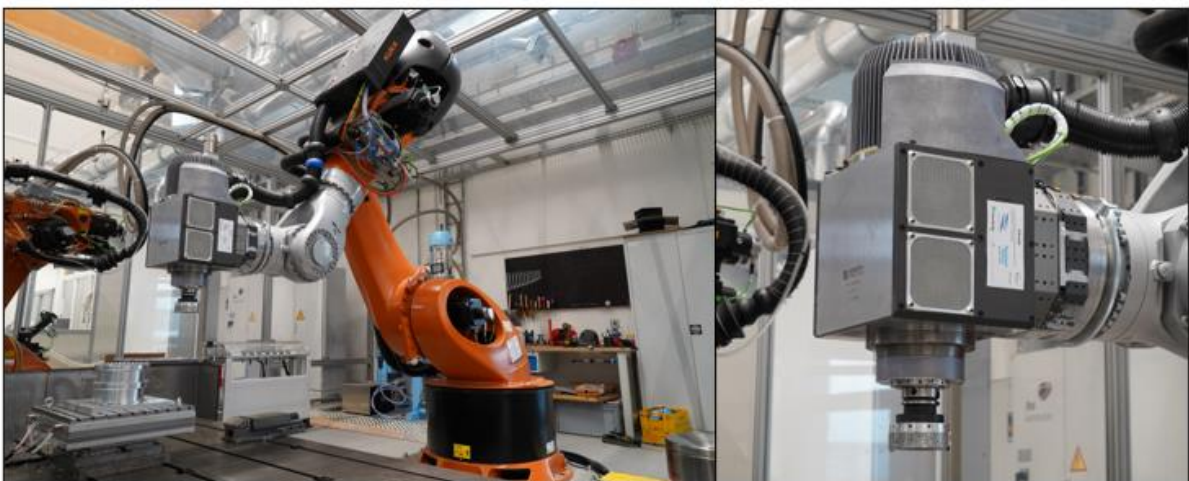


Abbildung 74: Leichtbau-Motorspindel befestigt an einen Industrieroboter

Das Wechselsystem ermöglichte im späteren Einsatz eine schnellere Anpassung (z. B. der Lüfter) bzw. den Wechsel der gesamten Leichtbau-Motorspindel. Zur Realisierung musste der Demonstrator entsprechend konstruktiv angepasst werden.

Als Optimierungsansatz wurde bereits eine Erhöhung des Lüfterstroms in Betracht gezogen und teilweise umgesetzt. Die bisher vorgesehenen vier Axiallüfter vom Typ 4414FN/39H der Firma Ebm-Papst mit den Abmessungen 119 mm x 119 mm x 25 mm erzeugten einen maximalen Volumenstrom von 225 m³/h, sodass alle vier Lüfter im optimalen Fall zusammen einen Volumenstrom von 900 m³/h erreichten.

Alternativ waren verfügbare Lüfter vom Typ 4114 NH6 S-Force mit den gleichen Außenabmessungen, jedoch einer Höhe von 38 mm, einsetzbar. Diese Lüfter erzeugten einen maximalen Volumenstrom von 440 m³/h, was bei vier Lüftern einen Gesamtvolumenstrom von 1.760 m³/h ergab. Dies entsprach nahezu einer Verdopplung des gesamten Volumenstroms. Um die 38 mm tiefen Lüfter anzubauen, wurden andere seitliche Abdeckungen konstruiert. Ein Wechsel zu den größeren Lüftern konnte mit wenig mechanischem und elektrischem Umbauaufwand realisiert werden. Mit einer Höhe von 38 mm konnten somit die Lüfter vom Typ 4114 N/2 H8P S-Force mit einem Volumenstrom von 570 m³/h eingesetzt werden, was einer Steigerung von 150 % der jetzigen Konfiguration entsprach.

Der vordere Spindelbereich wurde in Anlehnung an NACA-Profilen mit integrierten Störkonturen ausgeführt. Er wurde so konzipiert, dass eine drehrichtungsunabhängige Bearbeitung möglich war. Durch die Drehung der Antriebswelle wurde der vordere Spindelbereich in eine Drehbewegung versetzt. Die integrierten Störkonturen erzeugten eine Durchmischung der Kühlluft und verbesserten den Wärmeaustausch, was letztendlich dazu führte, dass weniger Wärme in das Innere der Motorspindel gelangte. Bereits durchgeführte Simulationen des Fraunhofer IPAs konnten zeigen, dass eine Vergrößerung der Oberfläche der vorderen Spindeleinheit sich positiv auf das innere Temperaturfeld auswirkte. Daher waren etwaige weitere Störkonturen (Rippen) an der Außenoberfläche der vorderen Spindeleinheit vorgesehen. Diese wurden jedoch im jetzigen Stadium nicht integriert, da der Fertigungsaufwand sehr hoch war. Daher wurde es im Konsortium im jetzigen Stadium nicht in der Leichtbau-Motorspindel integriert. Wenn die Versuche jedoch

zeigten, dass sich der vordere Bereich ungünstig erwärmte, würde dieses Design umgesetzt.

3.12 AP13: Projektabschluss und Dokumentation

Aufbauend auf AP3 und dessen forcierter Fertigungsstrategie sollte durch alle Projektpartner eine mögliche Integration der neu entwickelten Komponenten in die momentane Montagelinie erarbeitet werden. Dies geschah durch die Nutzung der trilateralen Zusammenarbeit zwischen der additiven und subtraktiven Fertigung, den Entwicklungskompetenzen von Roschiwal sowie der Umsetzung durch Reckerth. Das Arbeitspaket beschäftigte sich im Fokus mit der technischen Dokumentation des gesamten Projektvorhabens. Die Dokumentation und das Zusammenstellen der Ergebnisse übernahm das **Fraunhofer IPA**. Reckerth bilanzierte die Entwicklung der Motorspindel, während Roschiwal die Entwicklung des Kühlkörpers ganzheitlich unter wirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen betrachtete.

Gemeinsame Arbeitsergebnisse:

Die Entwicklung des Kühlkörpers war eng mit dem Gehäuse und den seitlichen Deckeln verbunden, die den Haupt-Kühlkörper umschlossen. Diese Einheit wurde im Folgenden als Zentral-Kühlkörper bezeichnet. Zusätzlich wurde der hintere Kühlkörper separat bilanziert.

Leichtbau-Motorspindel:

Am Ende dieser Entwicklung stellte sich heraus, dass der Haupt-Kühlkörper technisch realisierbar war. Somit konnte die Wasserkühlung durch eine Zwangs-Luftkühlung mittels Axialventilatoren ersetzt werden. Die Substitution des Kühlmediums Wasser durch Luft bei der Kühlung erforderte jedoch einen größeren Bauraum. Der benötigte Bauraum-Querschnitt für die Luftkühlung stieg dabei in der Breite von 175 mm auf 322 mm und in der Höhe von 175 mm auf 250 mm. Dies entsprach einer Querschnittsteigerung um den Faktor 2,5. In der Länge wuchs die Spindel von 642 mm auf 659 mm, also um den Faktor 1,03, gemessen von der Anlagefläche der Spindelwelle zur Hinterfläche der Buchse des Leistungssteckers. Das Gewicht vergrößerte sich im Vergleich zur Referenz-Motorspindel.

Haupt-Kühlkörper:

Aus konstruktiver Sicht waren für den Haupt-Kühlkörper mehrere Teile unterschiedlicher Komplexität notwendig. Das kubische Gehäuse wurde als das komplexeste Teil aufgrund der Bearbeitung und der vergleichsweise geringeren Wandstärken angesehen. Der eigentliche Kühlkörper, der damals im 3D-Druck-Verfahren hergestellt wurde, war auf Basis der geforderten Rahmenbedingungen weniger komplex. Diese beiden Teile verursachten den höchsten Mehraufwand und damit auch die Mehrkosten gegenüber der bisherigen wassergekühlten Motorspindel. Diese Teile mussten und konnten mit der gesamten Wasserkühlung (inklusive Verrohrung und Kompressor-Kühler) gegengerechnet werden. Die Entwicklung des Kühlkörpers wurde zudem unter wirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen bilanziert.

Hinterer Kühlkörper:

Der hintere Kühlkörper mit der Luftführung war so konstruiert, dass er nachträglich angebracht und gegebenenfalls durch andere Luftführungselemente ausgetauscht werden konnte.

4 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises zu entnehmen.

5 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die während der Projektlaufzeit des Verbundprojekts projektbezogen durchgeführten Arbeiten erfolgten nach bestem Gewissen und gemäß der grundlegenden Vorgabe des Projektträgers. Dabei wurden die notwendigen finanziellen Mittel entsprechend dem Vorhabenumfang und Erkenntnisgewinn angemessen eingesetzt. Der Aufwand der projektbezogenen durchgeführten Arbeiten erweist sich vor dem Hintergrund der erreichten Ziele weitestgehend als gerechtfertigt.

Jedoch hat sich bereits im Laufe der Projektarbeiten gezeigt, dass die vorher geplanten angesetzten Zeitfenster zum Entwurf der Leichtbau-Motorspindel, im Speziellen mit der Identifizierung eines idealen Kühlkörpers, deutlich mehr Zeit in Anspruch genommen hat. Die Verzögerung ist daher begründet, dass zusätzliche aufwendige thermische und strömungstechnische Simulationen sowie anschließende experimentelle Untersuchungen über die gesamte Projektlaufzeit (viele Iterationsschleifen) durchgeführt wurden, die die Bearbeitung der nachfolgenden Arbeitspakete verzögert haben. Des Weiteren hat das entwickelte Gesamtkonzept der Leichtbau-Motorspindel in Hybridbauweise und unter Einsatz verschiedenster Fertigungsmethoden (additiv, subtraktiv) sowie der notwendigen Nachbearbeitungsstrategien zur Einhaltung der erforderlichen Toleranzen zu massivem zeitlichem Mehraufwand geführt. Des Weiteren wurde auf Wunsch aller beteiligten Projektpartner beschlossen und entgegen der ursprünglichen Projektplanung, die Tests, Validierung und Optimierung des Gesamtsystems (AP 12) am institutseigenen Industrieroboter des Fraunhofer IPA durchzuführen (Laufzeitverlängerung Nr. 1).

Die erneute zweite kostenneutrale Laufzeitverlängerung ist aufgrund der eingeschränkten Fertigungskapazitäten von Reckerth nach der Beantragung der ersten Verlängerung zu begründen. Für die geplanten Nachbearbeitung der 3D-gedruckter Bauteile auf einem

Bearbeitungszentrum müssen zusätzliche Vorrichtungen konstruiert und gefertigt werden, die einen zeitlichen Mehraufwand mit sich bringen. Erst mit Abschluss der Herstellung der Leichtbau-Motorspindel durch Reckerth können die experimentellen Untersuchungen (AP 12: Test, Validierung und Optimierung Gesamtsystem) am Institutsroboter beim Fraunhofer IPA getätigt werden.

Die Aufgabenstellungen der dem Förderantrag zugrundeliegenden Arbeitspakete konnten dennoch vollständig bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen werden. Da sich die Projektergebnisse sehr gut in die akute Fragestellung der Energie- und Ressourceneffizienz einordnen lassen, werden sie zukünftig einen wesentlichen Beitrag leisten können.

6 Voraussichtlicher Nutzen

Ein großes Marktpotential dieser Technologie besteht im Bereich der materialabtragenden Werkzeugmaschinen und zunehmend bei robotergestützten Fertigungssystemen. Durch deren Flexibilität, Kosteneffizienz und die zunehmende Genauigkeit von Industrierobotern wird für die nächsten Jahre ein enormer Zuwachs der Roboter-Zerspanung für große Bauteile und komplexe 3D-Bauteilgeometrien erwartet. Der potenzielle Kundenkreis reicht vom Handwerksbetrieb bis hin zu größeren Industriebetrieben und bietet somit die bestmögliche Basis für eine erfolgreiche Marktdurchdringung und Produktakzeptanz.

Das aktuelle Entwicklungsprojekt kann bei erfolgreicher Umsetzung der dargestellten Ziele auch auf andere Bereiche ausgeweitet werden. Beispielsweise könnte die Technologie innerhalb der Roboterzerspanung Anwendung finden, wo die Traglast ein dominanter Faktor ist. Zudem kann die Substitution einer herkömmlichen Wasserkühlung durch eine Luftkühlung zusätzliche Ressourcen und Energie einsparen.

Um Bedenken potenzieller Kunden hinsichtlich der Luftkühlung einer Motorspindel auszuräumen und die wesentlichen Vorteile aufzuzeigen, ist angedacht, die Leichtbau-Motorspindel in einen Industrieroboter zu integrieren. Dadurch haben Kunden die Möglichkeit, im Rahmen einer Vor-Ort-Besichtigung im Forschungslabor des Fraunhofer IPA auf die neuartige Innovation aufmerksam gemacht zu werden.

Zusätzlich könnte die Implementierung dieser Technologie in der Industrie zu einer Reduzierung der Betriebskosten führen, da weniger Wartungsaufwand für Kühlsysteme erforderlich ist. Langfristig könnte dies auch zu einer höheren Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen beitragen, die diese innovative Lösung einsetzen. Eine zusätzliche Möglichkeit des Technologietransfers liegt in der Übertragung der in diesem Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse auf weitere Varianten von heute noch flüssigkeitsgekühlten Hochleistungsmotoren (Linear- und Servomotoren), die für viele Anwendungen (z. B. E-Mobilität) leichter dimensioniert und deren Energiebilanz optimiert werden müssen.

Im Anschluss an das Projekt werden die validierten Prototypen für Langzeituntersuchungen durchgezogen. In einer realen Produktionsumgebung sollen die Funktion des Systems

überprüft und eventuelle technische Mängel korrigiert werden. Durch weitere Kooperationen mit Industrie und Forschung soll die Entwicklung auch nach Projektende weiter vorangetrieben werden, um das System darüber hinaus auch für die oben erwähnten Industriezweige und Anwendungsbereiche nutzbar zu machen.

7 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt

Während der projektvorbereitenden Recherchen und innerhalb der Projektlaufzeit wurden keine Eintragungen identifiziert, die dem Projekt und den dargestellten Ergebnissen entgegenstehen würden. Für eine fundierte Aussage wurde eine erweiterte Patentrecherche durchgeführt. Das grundlegende Thema der Verbesserung der Kühleffizienz ist nicht neu und wird in vielen Bereichen kontinuierlich weiterverfolgt. Daher wurde bei der Patentrecherche nicht nur der Bereich der Werkzeugmaschinen und Motorspindeln betrachtet, sondern auch artfremde Bereiche wie beispielsweise Staubsauger einbezogen.

Die Patentrecherche ergab, dass zwar einige Patente existieren, die das Thema einer effektiveren Kühlung von Systemen ansprechen, jedoch wurden keine Patentschriften identifiziert, die dem Projektziel negativ entgegenwirken. Viele dieser Patente nutzen einen großen Anbau- oder Einbauraum für Ventilatoren oder Lüfter, was den Einsatz in einer Motorspindel im spanenden Umfeld signifikant einschränkt. In der Fertigungsumgebung von Bearbeitungszentren steht nur ein begrenzter Raum für die Motorspindel und etwaige zusätzliche Komponenten zur Verfügung. Jegliche geometrische Erweiterung würde den nutzbaren Freiheitsgrad der Bearbeitung negativ beeinflussen, insbesondere im 5-Achs-betrieb.

Somit sind nach jetzigem Stand keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt, die das gesamte Vorhaben negativ tangieren. Der Fortschritt des Projekts wird durch die Erkenntnisse der Patentrecherche unterstützt, die bestätigen, dass die angestrebte Lösung im aktuellen Kontext innovativ und umsetzbar ist.

8 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die im Verbundprojekt gewonnenen Forschungsergebnisse sollen im Sinne eines Wissens- und Technologietransfers verwendet werden. Neben den technischen Erkenntnissen von Roschiwal und Reckerth werden die erzielten Ergebnisse vom Fraunhofer IPA wissenschaftlich aufbereitet und präsentiert. Die Erfolgsaussichten der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse nach Projektende werden als sehr hoch eingeschätzt.

Die wissenschaftlichen Projektergebnisse werden in einschlägigen Fachmedien veröffentlicht, um das Vertrauen in die Technologie zu stärken und die Akzeptanz in der Industrie zu erhöhen. Das Fraunhofer IPA plant, die gewonnenen Erkenntnisse nach Projektende in zukünftigen Entwicklungsprojekten einzubringen, um die Ressourcen- und Energieeffizienz im Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen weiter zu verbessern.

Darüber hinaus werden die Erkenntnisse genutzt, um Industriepartnern den Einstieg in die additive Fertigung zu erleichtern und sie dabei zu unterstützen. Die oft skeptischen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) aus dem Maschinen- und Anlagenbau erhalten durch die Projektergebnisse und deren wissenschaftliche Absicherung eine Demonstration der Mehrwerte von Leichtbau, basierend auf einem praxisrelevanten und realisierten Szenario.

Das Vorhaben kann somit als Schrittmacher und Referenzprojekt für kleine und mittlere Serienprodukte fungieren und den Wunsch der KMU nach anwendungsorientierter Forschung bedienen. Alle Projektpartner können durch die erzielten Teilergebnisse in ihrem Fachgebiet potenzielle neue Kunden von den Vorteilen der neuartigen Technologien überzeugen. Nach jetzigem Stand sind die Chancen der Projektidee hinsichtlich des technischen Erfolgs als sehr gut einzustufen. Die einzelnen Technologien (additive Fertigung, Leichtbau, Spindeltechnik) sind vorhanden und werden im Rahmen des Projekts konsequent anhand des Anwendungsfalls „Motorspindeln“ umgesetzt.

Zusätzlich wird angestrebt, Feedback von Industriepartnern zu sammeln, um die Technologie weiter zu optimieren und anzupassen. Langfristig soll die Technologie nicht nur in

der aktuellen Anwendung, sondern auch in verwandten Bereichen wie der E-Mobilität und der Herstellung von Hochleistungsmotoren eingesetzt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu steigern.