
IGEL
Ingenieurgesellschaft Erich Leitner Aktiengesellschaft



Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem
Az: 25987-21/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

über das Thema
**Entwicklung einer energieeffizienten Kühlmittelpumpe mit
kombinierter Wirkung**

Eingereicht bei: Dr. Lefèvre, Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2, 49090 Osnabrück

Eingereicht von: Jörg Ströse
IGEL AG, Ingenieurgesellschaft Erich Leitner AG
Gewerbepark Nordost 7, 85560 Ebersberg

Eingereicht am: 13. Dezember 2010

IGEL
Ingenieurgesellschaft Erich Leitner Aktiengesellschaft



Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem
Az: 25987-21/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

über das Thema
**Entwicklung einer energieeffizienten Kühlmittelpumpe mit
kombinierter Wirkung**

Eingereicht bei: Dr. Lefèvre, Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2, 49090 Osnabrück

Eingereicht von: Jörg Ströse
IGEL AG, Ingenieurgesellschaft Erich Leitner AG
Gewerbepark Nordost 7, 85560 Ebersberg

Eingereicht am: 13. Dezember 2010

An dieser Stelle möchte ich mich bei der DBU, Deutschen Bundesstiftung Umwelt, bedanken. Insbesondere bei Herrn Dr. Lefèvre für die stets sehr kooperative Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt auch dem Vorstand der IGEL AG, Herrn Lucien Debertrand, für die zur Verfügung gestellten Ressourcen.

Vielen Dank auch an die am Projekt beteiligten Kollegen der IGEL AG, insbesondere Jessica, Jens, Rainer, Gernot, Josef, Daniel und Georg.

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|----|-------------------|---------|-----------|-------------|---------------------|
| Az | 25987-21/0 | Referat | 21 | Fördersumme | 100.000,00 € |
|----|-------------------|---------|-----------|-------------|---------------------|

| | |
|---------------------|--|
| Antragstitel | Entwicklung einer energieeffizienten Kühlmittelpumpe mit kombinierter Wirkung |
|---------------------|--|

Stichworte

| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) |
|------------------|-------------------|-------------|-----------------|
| 24 Monate | 12.12.2007 | | |

Zwischenberichte

| | | | |
|------------------------------|--|-------------------------------|------------------|
| Bewilligungsempfänger | IGEL Ingenieurgemeinschaft Erich Leitner AG Gewerbepark Nord-Ost 7 85560 Ebersberg | Tel | 08092 852 58-0 |
| | | Fax | 08092 852 58-400 |
| | | Projektleitung Jörg Ströse | |
| | | Bearbeiter | |

Kooperationspartner***Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens***

Trotz der unbestrittenen Vorzüge der elektrischen Kühlmittelpumpe wird diese nur bei einem OEM, BMW, eingesetzt. Wir wollen durch ein innovatives Konzept den Einsatzbereich dieser Pumpe erweitern und erwarten eine Kraftstoffersparnis von 0,2 l / 100 km oder 4,8 g CO₂ / 100 km bezogen auf eine mechanisch angetriebene Kühlmittelpumpe und auf den europäischen Fahrzyklus. Darüber hinaus sollen durch Umstellung des Generators auf Wasserkühlung die Lüfterräder entfallen, was zu einer zusätzlichen Kraftstoffersparnis führt. Schätzung 0,1 l / 100 km oder 2,4 g CO₂ / 100 km.

Unser innovatives Konzept ist weltweit einsetzbar und für PKW und NKW nutzbar.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Unsere Recherche ergab, dass Kostengründe, Baugröße und große Wirkungsgradverluste des Generators (um 1 Watt elektrische Leistung zu erhalten, muss der Generator mehr als 2 Watt mechanische Leistung aufnehmen) bei der Bereitstellung der elektrischen Leistung für die Pumpe einer größeren Verbreitung im Wege stehen. Parallel dazu gibt es einen Trend in der Automobilindustrie immer mehr elektrische Verbraucher ins Fahrzeug einzubauen, die alle vom Generator mit elektrischer Energie versorgt werden müssen. Durch immer höhere Leistungsanforderungen an den Generator wird auch dessen Verlustleistung in Form von Wärme immer größer. Die Wärmeabfuhr gestaltet sich zunehmend schwieriger und stößt an ihre Grenzen.

Mit unserem Konzept wollen wir die geschilderte Problematik lösen. Wir wollen eine kombinierte Kühlmittelpumpe entwickeln, die je nach Bedarfsfall elektrisch oder mechanisch angetrieben werden kann. Die Pumpe soll in das Generatorgehäuse integriert werden. Der Generator wird von Luftkühlung auf Wasserkühlung umgestellt. Die Kühlung des Generators erfolgt durch einen ihn umgebenden Kühlwassermantel.

Mit unserem Konzept erwarten wir eine Verbrauchsreduzierung von 0,3 l / 100 km bzw. eine Verringerung des CO₂ Ausstoßes um 7,2 g CO₂ / 100 km (Benzin) bezogen auf den europäischen Fahrzyklus. 0,2 l / 100 km ergeben sich durch die elektrische Kühlmittelpumpe und 0,1 l / 100 km durch die Umstellung des Generators auf Wasserkühlung (Entfall Lüfterräder). Da unser Konzept weltweit für PKW und NKW (LKW und Busse) einsetzbar ist, ergeben sich große CO₂ Einsparmöglichkeiten.

Zum Ende des Projektes soll den OEMs ein funktionsfähiger Prototyp einer kombinierten elektrisch-mechanischen Kühlmittelpumpe vorgestellt werden. Diese soll umweltfreundlicher und kostengünstiger als eine rein elektrische Pumpe sein. Weiterhin wird die Effizienz des Generators gesteigert und seine Kühlung verbessert.

Zur Erreichung des Projektzieles, nämlich die Entwicklung eines funktionsfähigen Prototypen, haben wir den Entwicklungsprozess in drei Hauptbaugruppen unterteilt. Die erste Hauptbaugruppe beinhaltet die rechnerische und konstruktive Auslegung der Pumpe, die zweite umfasst die Integration des Generators und der Kupplung und die dritte schließlich die Integration des Prototypen ins Fahrzeug. Jede Hauptbaugruppe besteht wiederum aus einer Vielzahl von Einzelschritten. Detaillierte Informationen sind im Entwicklungsplan dargestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Angeregt durch Beiträge in der Motortechnischen Zeitschrift (MTZ) im Jahre 2005 entstand eine Diskussion, warum sich die elektrische Wasserpumpe (im weiteren als E-Wapu bezeichnet) als Hauptkühlmittelpumpe nicht durchsetzt, obwohl sie unbestrittene funktionale Vorteile hat. Gegen ihre weitere Verbreitung sprechen vor allem Kosten, Gewicht und Bauraum.

Generatoren in Kraftfahrzeugen stoßen durch immer höhere Leistungsanforderungen an ihre Leistungsgrenzen. Durch zunehmende Packagedichte im Motorraum steigt die Anforderung an die Kühlung.

Das führte zum Ansatz, die Vorteile der E-Wapu beizubehalten, sie aber kostengünstiger auszulegen und gleichzeitig die Kühlung des Generators zu verbessern. Dieser Ansatz wurde in drei aufeinander aufbauende Baustufen umgesetzt.

In der Baustufe 1 stand die Auslegung des Pumpenrades im Vordergrund. Über mehrere Iterationsschleifen wurden der Durchmesser und die Blattanzahl rechnerisch festgelegt. Eine große Herausforderung dabei ist die Drehzahlspreizung. Auf einem stationären Prüfstand wurden die Berechnungsergebnisse bestätigt.

In der nachfolgenden Baustufe 2 wurden ein wassergekühlter Generator und eine Magnetkupplung integriert. Hauptaugenmerk lag auf dem Zusammenspiel von Generator und Kupplung sowie auf dem Verhalten des Gesamtsystems bei hohen Drehzahlen. Durch die Zwangskopplung des Generators an die Motordrehzahl des Verbrennungsmotors mit einer ca. 2,8fachen Übersetzung, wird das Pumpenrad mit für Wasserpumpen unüblich hohen Drehzahlen betrieben. Dadurch kommt es zu Kavitation mit entsprechenden Auswirkungen auf den Durchfluss.

In der Baustufe 3 wurde das Gesamtsystem in ein repräsentatives Serienfahrzeug integriert. Herausfordernd dabei war, die vorhandene Packagedichte und die Einbindung des Gesamtsystems in das Kühlsystem - einschließlich der zu Versuchszwecken erforderlichen Messausrüstung. Durch das bewusste Weglassen einiger nicht zwingend benötigter Aggregate wurde dies realisiert. Parallel dazu wurden erste Vermarktungsaktivitäten gestartet.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Während des Projektes, wurde im Rahmen der Fahrzeugbeschaffung das Konzept indirekt einem OEM vorgestellt. Konsequenz daraus war, daß wir nicht mehr direkt einen OEM ansprechen werden, weil wir nicht Serienhersteller werden wollen. Vielmehr konzentrieren wir uns auf größere Systemlieferanten, um denen diese Technologie anzubieten. Wir orientieren uns auch international.

Fazit

Das Projektziel wurde erreicht. Die drei Baustufen wurden erfolgreich abgeschlossen. Es wurde ein funktionsfähiger Prototyp in einem Fahrzeug eingebaut.

Während des Projektes, wurde im Rahmen der Fahrzeugbeschaffung das Konzept indirekt einem OEM vorgestellt. Konsequenz daraus war, daß wir nicht mehr direkt einen OEM ansprechen werden, weil wir nicht Serienhersteller werden wollen. Vielmehr konzentrieren wir uns auf größere Systemlieferanten, um denen diese Technologie anzubieten. Wir orientieren uns auch international.

Eine direkte Messung über eine Verringerung des Kraftstoffverbrauches ist nicht möglich, da das Fahrzeug bereits über eine serienmäßige E-Wapu verfügt und die technische Basis durch den Umbau verändert wurde. Der Riementrieb ist geometrisch anders, der Klimakompressor fehlt und es gibt eine zusätzliche Umlenkrolle. Damit ist eine Messung mit dem Serienstand nicht vergleichbar.

Gegenüber den herkömmlichen mechanisch angetriebenen Wasserpumpen wird es eine Kraftstoffeinsparung geben, gerade wegen der unterschiedlichen Leistungsaufnahmen und Betriebsstrategien.

Wir nehmen hier die Argumentation bei der Einführung der serienmäßigen E-Wapu auf. Verbrauchspotentiale erschließen sich beim Warmlauf und bei der Steuerung der Motortemperatur in den verschiedenen Betriebsarten des Verbrennungsmotors.

Um unser Konzept beispielhaft zu bestätigen, haben wir die Leistungsaufnahme im E-Wapu Betrieb auf 100 Watt begrenzt. Das ergibt stationär auf dem Prüfstand einen Volumenstrom von 3.000 l/h. Im Fahrzeug erreichen wir diesen Wert wegen des höheren Druckverlustes nicht ganz.

Die Durchflussmessung für das serienmäßige Kühlsystem auf dem Rollenprüfstand ergab bei 3000 l/h eine Geschwindigkeit von ca. 145 km/h (erhofft waren 160 bis 170 km/h). Damit liegt die Geschwindigkeit etwas niedriger als erwartet. Beim Vergleich der gemessenen und berechneten Kurven aus Abbildung 37 (rote Kurven entsprechen der 100 Watt Leistungsaufnahme) fällt auf, dass bei einem Volumenstrom von 3.000 l/h eine Differenz vorhanden ist, die auf geometrische Abweichungen beim Pumpenrad zurückgeführt wird.

Basierend auf dem jetzigen Stand des Prototypen gibt es noch Potentiale zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Pumpe im E-Wapubetrieb.

Die Geometrie des Pumpenrades wurde bis zum jetzigen Stand beibehalten (Durchmesser und Anzahl der Schaufeln). Ein anderes Fertigungsverfahren, welches das CAD-Modell genauer abbildet, bringt eine Verbesserung. Bedingt durch das jetzige Herstellverfahren müssen wir eine Schaufeldicke von 2mm vorhalten. Dünner kann nicht gegossen werden. Eine Verringerung der Schaufeldicke führt zur Vergrößerung des Wasserraumes des Pumpenrades und damit zu einer Leistungssteigerung.

Eine Optimierung der Anströmung des Pumpenrades kann durch Detailarbeit im Bereich der Gleitringdichtung gelöst werden.

Beim Außengehäuse ist es denkbar, den Innenflächen (Wassermantel) eine spiralförmige Kontur zu geben, die das Kühlmittel in einen Drall versetzen.

Eine optimale Auslegung des E-Motors für die Leistungsaufnahme in Abstimmung mit der Auslegung des Pumpenrades bringt weiteres Potential.

Erwähnt werden muss auch, dass die jetzige Verschlauchung im Fahrzeug zu einem erhöhten Druckverlust im Kühlsystem führt.

Wir sind überzeugt, dass die aufgezeigten Verbesserungspotentiale zu einer spürbaren Leistungssteigerung führen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 6 |
| Begriffsverzeichnis | 7 |
| 1. Zusammenfassung | 8 |
| 2. Intention | 10 |
| 3. Entwicklung einer energieeffizienten Kühlmittelpumpe mit kombinierter Wirkung | 14 |
| 3.1 <i>Das Konzept</i> | 14 |
| 3.2 <i>Entwicklungsbaustufen</i> | 16 |
| 3.2.1 Baustufe 1 | 16 |
| 3.2.1.1 Auslegungsschwerpunkt..... | 16 |
| 3.2.1.2 Prüfstand..... | 21 |
| 3.2.1.3 Ergebnisse der Baustufe 1..... | 24 |
| 3.2.2 Baustufe 2 | 27 |
| 3.2.2.1 Auslegung | 27 |
| 3.2.2.2 Prüfstand..... | 31 |
| 3.2.2.3 Ergebnisse | 32 |
| 3.2.3 Baustufe 3 | 35 |
| 3.2.3.1 Das Versuchsfahrzeug..... | 35 |
| 3.2.3.2 Der Prototyp und sein Einbau ins Fahrzeug..... | 37 |
| 3.2.3.3 Ergebnisse | 40 |
| 3.3 <i>Erreichung des Projektzieles und Fazit</i> | 46 |
| 4. Projektstand per 30. November 2010 | 49 |
| 4.1 <i>Patentstand</i> | 49 |
| 4.2 <i>Mögliches Serienkonzept</i> | 49 |
| Literaturverzeichnis | 51 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Wirkungsgrad-Kennfelder für Generatoren K1 und N1, beispielhaft,..... | 11 |
| Abbildung 2: Verlustaufteilung bei Drehstromgeneratoren..... | 12 |
| Abbildung 3: grafische Darstellung der Auslegung..... | 14 |
| Abbildung 4: Normaler Fahrbetrieb - offene Kupplung: | 15 |
| Abbildung 5: Erweiterter Fahrbetrieb - geschlossene Kupplung: | 15 |
| Abbildung 6: Druckverlauf über Volumenstrom | 17 |
| Abbildung 7: Innere Leistung | 18 |
| Abbildung 8: Vergleich innere Wirkungsgrade..... | 18 |
| Abbildung 9: Kavitationsschaubild..... | 19 |
| Abbildung 10: Pumpenrad,..... | 20 |
| Abbildung 11: Prüfstand Baustufe 1 | 21 |
| Abbildung 12: Prüfstand mit Manometer, Thermometer, Drosselstelle, Heizstäbe | 22 |
| Abbildung 13: Druckmesssensoren der Fa. Kobold vor und nach dem Pumpenrad | 22 |
| Abbildung 14: Temperatursensoren und Drehzahlmesser | 23 |
| Abbildung 15: Temperatursensoren und Drehzahlmesser | 23 |
| Abbildung 16: Vergleich Berechnung und Messung bei verschiedenen Leistungen | 24 |
| Abbildung 17: Auslegungspunkt Pumpe 5.500 l/h bei 0,6 bar | 25 |
| Abbildung 18: 75 Watt elektrische Leistung, ca. 4500 UPM..... | 26 |
| Abbildung 19: 100 Watt elektrische Leistung, ca. 5300 UPM..... | 26 |
| Abbildung 20: 140 Watt elektrische Leistung, ca. 6350 UPM..... | 27 |
| Abbildung 21: der verwendete Generator im Schnitt, | 28 |
| Abbildung 22: der Generator nach dem Umbau | 29 |
| Abbildung 23: Magnetkupplung auf E-Motorseite..... | 30 |
| Abbildung 24: Magnetkupplung auf Generatorseite | 31 |
| Abbildung 25: Ansicht Prüfstand Baustufe 2 | 32 |
| Abbildung 26: 100 Watt elektrische Leistung | 33 |
| Abbildung 27: 140 Watt elektrische Leistung | 34 |
| Abbildung 28: Verlauf Volumenstrom bei höheren Drehzahlen | 35 |
| Abbildung 29: Das umgebaute Versuchsfahrzeug für die Messung auf dem Rollenprüfstand | 37 |
| Abbildung 30: Luncker im Außengehäuse | 38 |
| Abbildung 31: Simulation Druckverlust im Wassermantel..... | 39 |
| Abbildung 32: Prototyp Baustufe 3, einbaufertig für das Fahrzeug..... | 40 |
| Abbildung 33: Der eingebaute Prototyp im Fahrzeug | 40 |
| Abbildung 34: Messung Rollenprüfstand 0% Steigung | 41 |
| Abbildung 35: Messung Rollenprüfstand 5% Steigung | 42 |
| Abbildung 36: Messung Rollenprüfstand 10% Steigung..... | 43 |
| Abbildung 37: gemessener Volumenstrom mit E-Wapu Betrieb im Fahrzeug..... | 44 |
| Abbildung 38: Verlauf Volumenstrom bei höheren Drehzahlen im Fahrzeug..... | 45 |
| Abbildung 39: Vergleich Volumenstrom stationär und serienmäßiger Zustand..... | 47 |
| Abbildung 40: Volumenstrom im E-Wapu Betrieb im Fahrzeug bezogen auf die elektrische Antriebsleistung..... | 47 |
| Abbildung 41: Konzept einer möglichen Serienlösung | 50 |

Begriffsverzeichnis

Folgende Begriffe und Abkürzungen werden in dem Bericht verwendet:

| | |
|-------------------|--|
| E-Wapu | elektrische Wasserpumpe |
| OEM | Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster) |
| Rapid-Prototyping | schnelles, kostengünstiges Verfahren zur Herstellung von Teilen mit begrenzter Stückzahl |
| T | Temperatur (°C) |
| U | Spannung in Volt (V) |
| I | Stromstärke in Ampere (A) |
| Delta p | Druckaufbau/Druckdifferenz (bar) |
| n | UPM (Umdrehungen pro Minute), U/min) |
| p | Druck (bar) |
| Q, V | Volumenstrom (l/h) |
| P | Leistung (Watt) oder (kW) |

1. Zusammenfassung

Im folgenden Abschlußbericht wird die Entwicklung einer energieeffizienten Kühlmittelpumpe von der Idee bis zu einem funktionsfähigen Prototyp im Fahrzeug beschrieben.

Angeregt durch Beiträge in der Motortechnischen Zeitschrift (MTZ) 3/2005¹ und 11/2005² entstand eine Diskussion, warum sich die elektrische Wasserpumpe (im Weiteren als E-Wapu bezeichnet) als Hauptkühlmittelpumpe nicht durchsetzt, obwohl sie unbestrittene funktionale Vorteile hat. Gegen ihre weitere Verbreitung sprechen vor allem Kosten, hydraulische Leistung, Gewicht und Bauraum.

Generatoren in Kraftfahrzeugen stoßen durch immer höhere Bordnetzanforderungen an ihre Leistungsgrenzen. Durch zunehmende Packagedichte im Motorraum steigt die Anforderung an die Kühlung.

Das führte zum Ansatz, die Vorteile der E-Wapu beizubehalten, sie aber kostengünstiger auszulegen und gleichzeitig die Kühlung des Generators zu verbessern. Dieser Ansatz wurde in drei aufeinander aufbauende Baustufen umgesetzt.

In der Baustufe 1 stand die Auslegung des Pumpenrades im Vordergrund. Über mehrere Iterationsschleifen wurden der Durchmesser und die Blattanzahl rechnerisch festgelegt. Eine große Herausforderung dabei ist die Drehzahlspreizung. Auf einem stationären Prüfstand wurden die Berechnungsergebnisse bestätigt.

In der nachfolgenden Baustufe 2 wurden ein wassergekühlter Generator und eine Magnetkupplung integriert. Hauptaugenmerk lag auf dem Zusammenspiel

¹ MTZ 3/2005 Bedarfsabhängig geregelte Motorkühlung- Versuch in Simulation

² MTZ 11/2005 Das Wärmemanagement des neuen BMW Reihensechszylindermotors, MTZ 11/2005 Auslegung eines Kühlsystems mit elektrischer Kühlmittelpumpe

von Generator und Kupplung sowie auf dem Verhalten des Gesamtsystems bei hohen Drehzahlen. Durch die Zwangskopplung des Generators an die Motordrehzahl des Verbrennungsmotors mit einer ca. 2,8fachen Übersetzung, wird das Pumpenrad mit für Wasserpumpen unüblich hohen Drehzahlen betrieben. Dadurch kommt es zu Kavitation mit entsprechenden Auswirkungen auf den Durchfluss.

In der Baustufe 3 wurde das Gesamtsystem in ein repräsentatives Serienfahrzeug integriert. Herausfordernd dabei war, die vorhandene Packagedichte und die Einbindung des Gesamtsystems in das Kühlsystem - einschließlich der zu Versuchszwecken erforderlichen Messausrüstung. Durch das bewusste Weglassen einiger nicht zwingend benötigter Aggregate wurde dies realisiert. Parallel dazu wurden erste Vermarktungsaktivitäten gestartet.

2. Intention

Der sparsame Umgang mit fossilen Brennstoffen und damit die Vermeidung von CO₂ spielt eine immer größere werdende Rolle in der Automobilindustrie. Es gibt verschiedene Ansätze zur Einsparung von CO₂. Beispielhaft sollen einige nachfolgend genannt werden, die zur Entstehung des Konzeptes beigetragen haben.

Der Kaltstart des Verbrennungsmotors und die sich anschließende Warmlaufphase bedingen einen erhöhten Kraftstoffverbrauch und Emissionsausstoß. Das soll möglichst vermieden werden. Durch eine Kapselung des Motorraumes im Allgemeinen und vom Motor im speziellen wird die Wärmeabgabe des Motors bei Stillstand an die Umgebung erschwert, d.h. er kühlt sehr langsam ab. Gleichzeitig ist aber bei Betrieb des Motors mit höheren Motorraumtemperaturen zu rechnen.

Ein weiterer Trend ist die bedarfsorientierte Auslegung der Nebenaggregate, Stichwort „riemenloser Motor“. Dazu zählen die intelligente Generatorregelung, elektrischer Klimakompressor, elektrische Lenkunterstützung, elektrische Wasserpumpe (E-Wapu), kenfeldgeregelte Ölpumpe.

Seit einigen Jahren gibt es bei den OEM's³ den Trend zum Downsizing, d.h. großvolumige Motoren werden durch kleinvolumige ersetzt. Diese kleinvolumigen Motoren sind in der Regel technisch anspruchsvoller als ihre entsprechenden Vorgänger (z.B. durch Turboaufladung). Man verspricht sich dadurch eine Kraftstoffeinsparung. Dieser Trend ist uneinheitlich über die verschiedenen Fahrzeugklassen hinweg.

Bei downgesizten Motoren ist das Kühlsystem oftmals sehr komplex. Neben dem Hauptkühlkreislauf gibt es noch manchmal den Niedrigtemperaturkreislauf mit separater Kühlmittelpumpe und eventuell noch einen Ölkühlkreislauf.

³ OEM: Original Equipment Manufacturer

Der eigentliche Kühler ist ein Kühlpaket bestehend aus dem Wasserkühler, Niedertemperaturkühler, Ladeluftkühler, Kühlschleife für Lenkunterstützung und dem Klimakühler.

In den allermeisten Fahrzeugen werden luftgekühlte Generatoren eingesetzt. Durch immer größer werdende Leistungsanforderungen, höhere Motorraumtemperaturen und höhere Packagedichte stoßen diese Generatoren jedoch an ihre Leistungsgrenzen. Zukünftige, noch leistungsfähigere Generatoren (Stichwort: Elektrifizierung des Antriebs) werden eine Wasserkühlung haben.

Die jetzt eingesetzten Generatoren haben keinen besonders hohen Wirkungsgrad.⁴ Hier liegt ein bisher ungenutztes CO₂ Potential, welches aber nicht Gegenstand dieses Projektes ist.

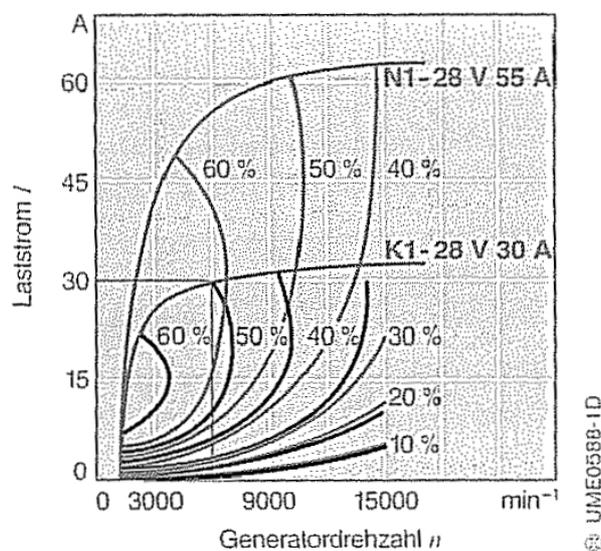


Abbildung 1: Wirkungsgrad-Kennfelder für Generatoren K1 und N1, beispielhaft
Quelle: Robert Bosch GmbH

⁴ Robert Bosch GmbH: Generatoren und Starter, S.41

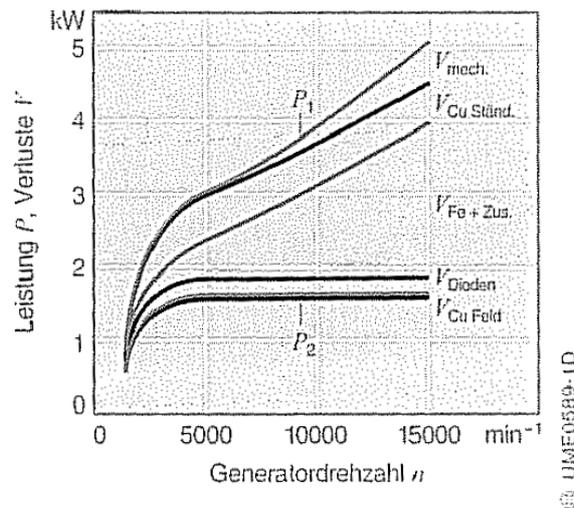


Abbildung 2: Verlustaufteilung bei Drehstromgeneratoren

P_1 = aufgenommene mechanische Leistung, P_2 = abgegebene elektrische Leistung

Quelle: Robert Bosch GmbH

Status quo Wasserpumpen/E-Wapu

Hauptsächlich werden in Kraftfahrzeugen mechanisch angetriebene Kühlmittelpumpen eingesetzt, d.h. sie sind mit der Drehzahl des Verbrennungsmotors gekoppelt. Nachteilig bei diesem Konzept ist, dass die Pumpe bereits bei niedrigen Drehzahlen einen ausreichend hohen Volumenstrom zur Abfuhr der Wärmemenge bereitstellen muss. Diese Fördercharakteristik führt dann bei hohen Drehzahlen des Verbrennungsmotors zu hohen Volumenströmen und Drücken, die nicht notwendig sind. Kostenmäßig sind mechanische Pumpen gegenüber der E-Wapu deutlich im Vorteil.

Angeregt durch verschiedene Veröffentlichungen in der MTZ (03/2005⁵ und 11/2005⁶) und neuen Trends in der Motorenentwicklung (Downsizing, Elektrifizierung des Antriebes) entstand eine Diskussion über den Einsatz, die Auslegung und die Zukunft von Kühlmittelpumpen und Generatoren.

⁵ MTZ 3/2005 Bedarfsabhängig geregelte Motorkühlung- Versuch in Simulation

⁶ MTZ 11/2005 Das Wärmemanagement des neuen BMW Reihensechszylinder Motors
MTZ 11/2005 Auslegung eines Kühlsystems mit elektrischer Kühlmittelpumpe

Die Fa. Elring-Klinger beschreibt in einem Artikel eine bedarfsabhängige Kühlung eines Verbrennungsmotors mittels einer Zylinderkopfdichtung mit Temperaturmesssensoren und einer E-Wapu. Auf die Vor- und Nachteile einer mit Sensoren ausgerüsteten Zylinderkopfdichtung soll hier nicht näher eingegangen werden. Für uns ist insbesondere interessant, wie sich das Kühlsystem mit einer elektrischen Pumpe verhält. In den Bildern 8 bis 10 ist die geringe Einschaltdauer der E-Wapu abgebildet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei diesen Tests die Pumpe die überwiegende Zeit stillstand. Dies ist ein großes Potential zur Hebung von CO₂ Potentialen gegenüber den herkömmlich (mechanisch) angetriebenen Wasserpumpen.

Die Fa. Behr befasst sich mit dem Nachteil der hohen Kosten einer E-Wapu und entwickelt ein Konzept eines druckverlustoptimierten Kühlsystems zur Kompensierung der höheren Kosten. Es ist ihnen gelungen, die Leistungsaufnahme der Kühlmittelpumpe soweit abzusenken, dass die Vorteile einer E-Wapu die Kosten mehr als aufwiegen.⁷

Die Fa. BMW stellt ausführlich das Wärmemanagement eines 6-Zylinder Motors (Typ N52) dar. Aus Sicht der E-Wapu lassen sich folgende Vorteile identifizieren:

- Positive Beeinflussung des Emissionsverhaltens bei kaltem Motor
- Hebung von CO₂ Potentialen durch Verkürzung der Warmlaufphase
- Eine Kraftstoffeinsparung von 2%.
- Verschiedene Betriebsstrategien des Motors⁸

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass gegen eine weitere Verbreitung der E-Wapu vor allem Kostengründe sprechen.

⁷MTZ 11/2005 Auslegung eines Kühlsystems mit elektrischer Kühlmittelpumpe

⁸ MTZ 11/2005 Das Wärmemanagement des neuen BMW Reihensechszylinder motors, Bild 5

3. Entwicklung einer energieeffizienten Kühlmittelpumpe mit kombinierter Wirkung

3.1 Das Konzept

Sollen die Vorteile einer E-Wapu beibehalten und andererseits die Kosten gesenkt werden, führt dies zwangsläufig zu einer kleineren E-Wapu. Das bedeutet zugleich aber auch eine geringere Leistung.

Die Interpretation der Informationen aus den Artikeln der MTZ (kurze Einschaltdauer und damit auch geringe mittlere Leistungsaufnahme) führen zu der Erkenntnis, dass es auch mit einer kleinen, leistungsschwachen E-Wapu möglich ist, ein Fahrzeug eingeschränkt (Teillast) zu betreiben und die Vorteile dieser E-Wapu erhalten bleiben. Hohe Anforderungen an die Kühlleistung werden hier nicht abgedeckt, müssen aber vorgehalten werden.

Wird das Fahrprofil des Normalfahrers betrachtet, z.B. täglicher Weg zur Arbeit, so sind keine hohen Anforderungen an die Kühlleistung zu erwarten, d.h. er betreibt das Fahrzeug überwiegend im Teillastbereich.

Diese beiden Aspekte führen dazu, die E-Wapu leistungsmäßig grundsätzlich nur für den Teillastbereich auszulegen.

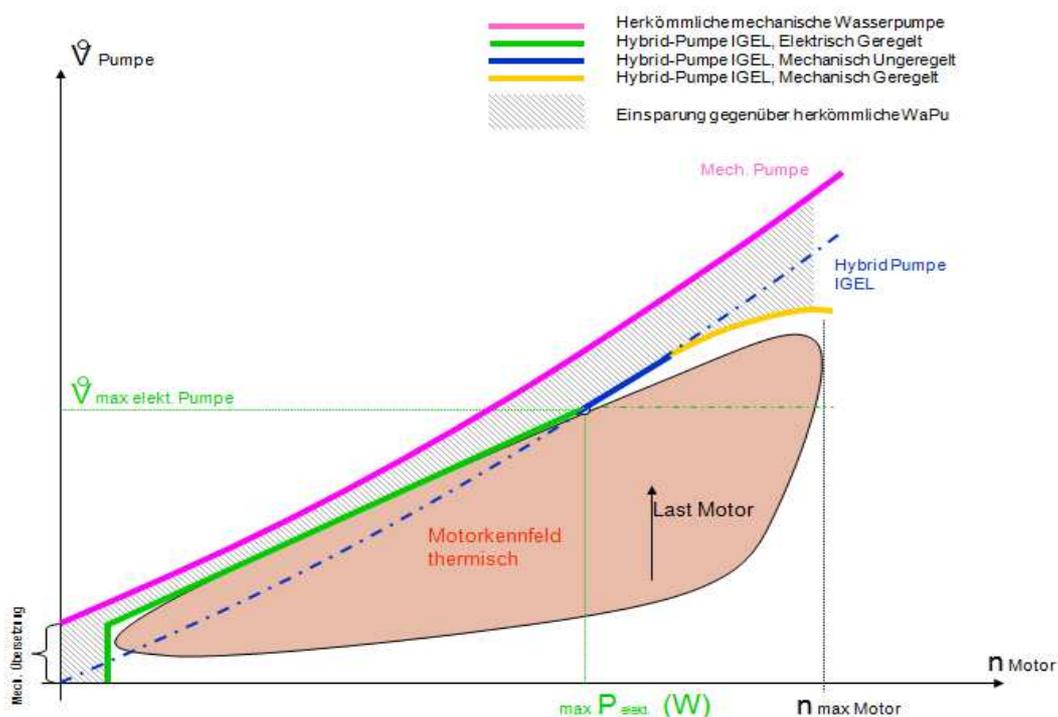


Abbildung 3: grafische Darstellung der Auslegung

Über eine schaltbare Kupplung wird bei hohem Kühlungsbedarf die Antriebswelle des E-Motors kraftschlüssig mit der Generatorwelle verbunden. Es steht ein hoher Volumenstrom zur Verfügung, da der Generator mit verhältnismäßig hohen Drehzahlen läuft. Der E-Motor wird dabei abgeschaltet. Mit einer entsprechenden Ansteuerung könnte er auch als Generator verwendet werden.

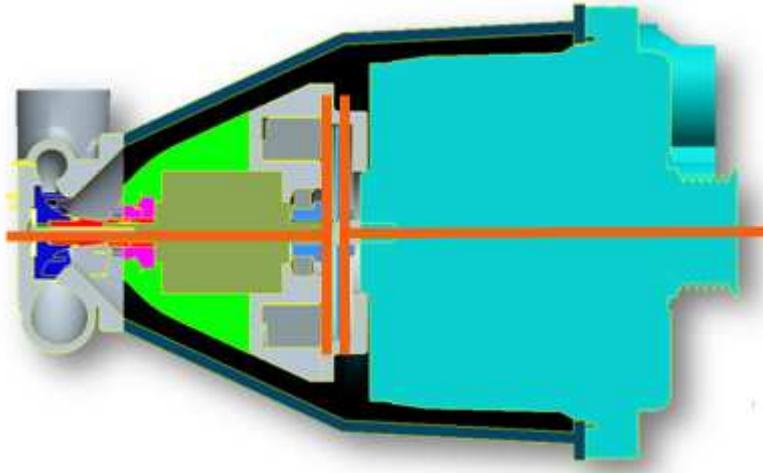


Abbildung 4: Normaler Fahrbetrieb - offene Kupplung

die E-Wapu arbeitet unabhängig von der Motordrehzahl, Drehzahlregelung basierend auf Motorlast oder Kühlungsbedarf, E-Motor mit Pumpenrad funktioniert analog elektrischer Kühlmittelpumpe

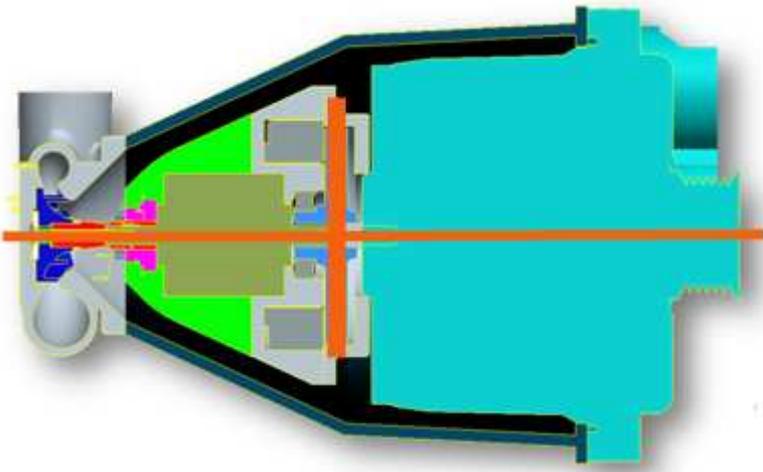


Abbildung 5: Erweiterter Fahrbetrieb - geschlossene Kupplung:

nur wenn ein hoher Kühlungsbedarf besteht (Kickdown bei Überholvorgang, schnelle Bergfahrt, Bergfahrt mit Hänger), über die Magnetkupplung wird die Antriebswelle des E-Motors mit der Generatorwelle verbunden

Dieses Konzept wurde in drei Entwicklungsbaustufen umgesetzt.

3.2 Entwicklungsbaustufen

3.2.1 Baustufe 1

3.2.1.1 Auslegungsschwerpunkt

Die E-Wapu, die BMW als Hauptkühlmittelpumpe in den Fahrzeugen einsetzt, ist als Nassläufer konzipiert.⁹ Nassläufer heißt, dass der Rotor des E-Motors vom Kühlwasser umgeben ist. Damit die metallischen (und somit magnetischen) Teile des Rotors nicht direkt mit dem Kühlmittel in Berührung kommen, ist ein Schutz vorzusehen. Dieser Schutz vergrößert den Spalt zwischen Rotor und Stator, was eine Verschlechterung des Wirkungsgrades zur Folge hat.

Wir haben uns für das Trockenläuferprinzip entschieden, mit konventioneller Abdichtung des Wasserraumes mittels einer Gleitringdichtung.

Pumpen werden nach einem vorgegebenen Arbeitspunkt ausgelegt. Der Arbeitspunkt beinhaltet den Volumenstrom und den dazugehörigen Druck. In Abwägung unseres Konzepts zwei Betriebsbereiche abdecken zu müssen, haben wir uns für 5500 l/h und 0,6 bar entschieden. Um für den normalen Fahrbetrieb (E-Wapu Betrieb) möglichst viel hydraulische Leistung zur Verfügung zu haben, ist ein guter Wirkungsgrad anzustreben. Andererseits muss bei dem erweiterten Fahrbetrieb der Einfluss der Kavitation und des von der Pumpe erzeugten Druckes berücksichtigt werden. Der von uns gewählte Arbeitspunkt bedeutet nicht, die Leistung des E-Motors dahingehend auszulegen, sondern stellt einen Kompromiss aus den beiden Betriebsbereichen dar.

Mit unserem Konzept müssen Drehzahlen bis ca. 18.000 UPM abgedeckt werden. Im E-Wapu Betrieb soll die Pumpe sehr effizient arbeiten. Das entspricht einem Drehzahlbereich von 4.000 bis 6.500 UPM. Andererseits soll sie bei sehr hohen Drehzahlen und den damit verbundenen

⁹ MTZ 11/2004 Immer richtig temperiert, Thermomanagement mit elektrischer Kühlmittelpumpe, S. 883

Kavitationserscheinungen noch genügend Volumenstrom und Druck liefern. Dafür musste ein Kompromiss gefunden werden.

Eine Berechnungssimulation ergab, dass ab einer Drehzahl von 9.000 UPM Kavitation auftritt.

Über Iterationsschleifen kamen wir von einem Pumpenraddurchmesser mit 51mm und sechs Flügelblätter zu einem Pumpenraddurchmesser mit 40mm und fünf Flügelblätter. Durchfluss, Druckaufbau und Kavitation wurden dabei entsprechend berechnet/simuliert.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse von Simulation/Berechnung, welche die Fa. Indesa für uns durchführte.

Das Pumpenrad mit 51mm Durchmesser erwies sich für unsere Anwendung als zu groß.

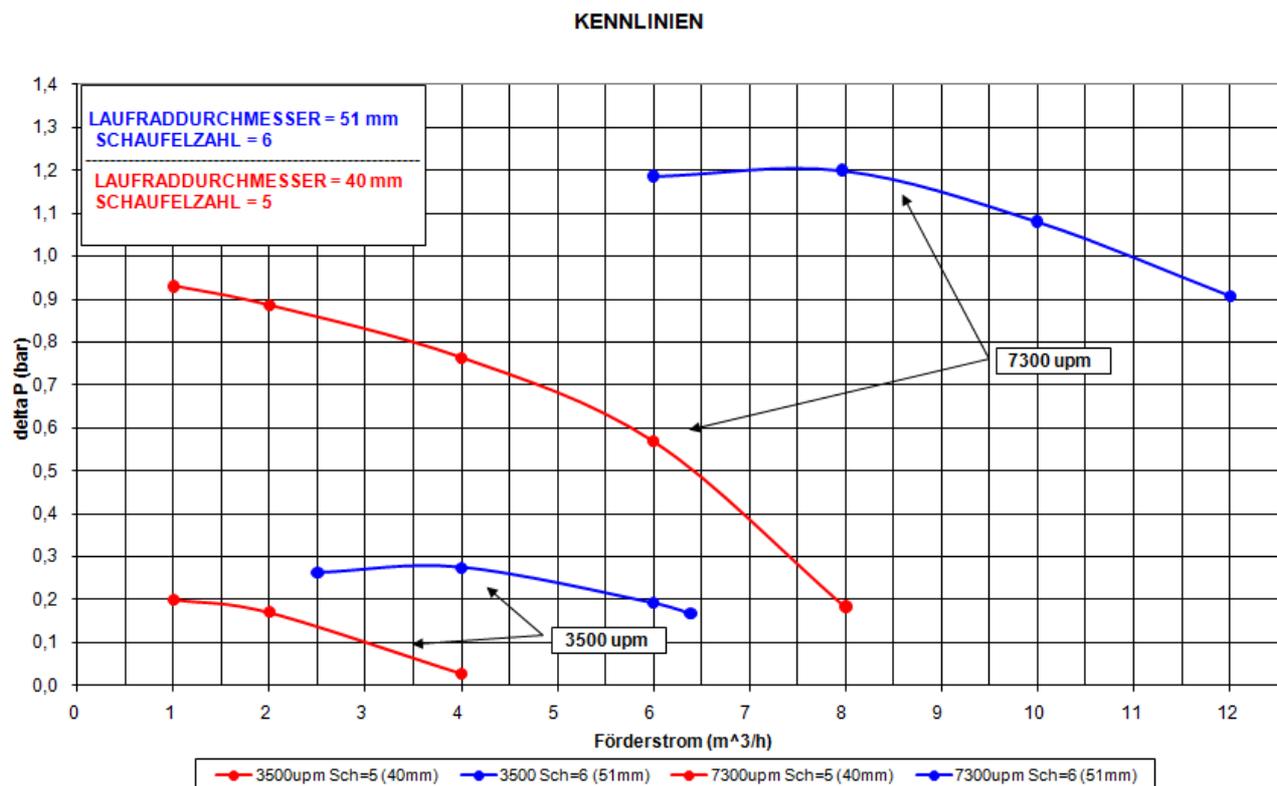


Abbildung 6: Druckverlauf über Volumenstrom

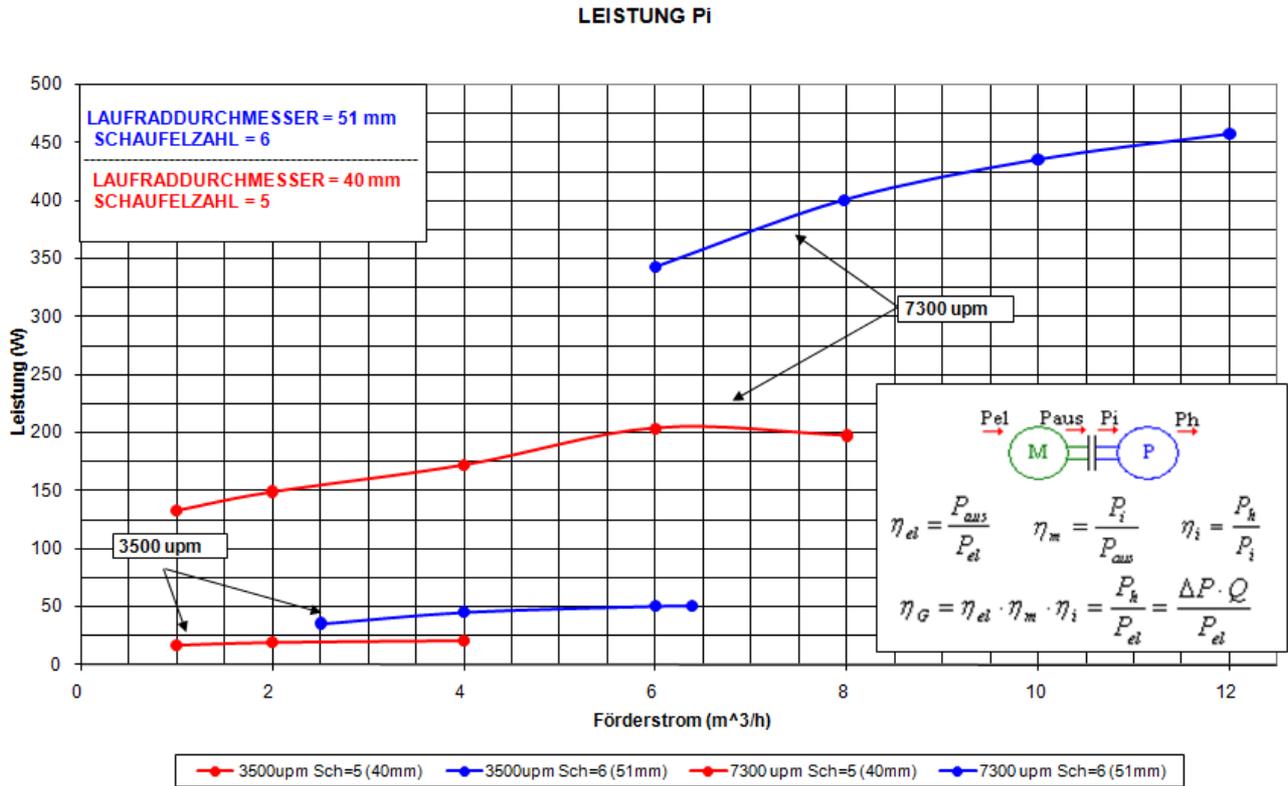


Abbildung 7: Innere Leistung

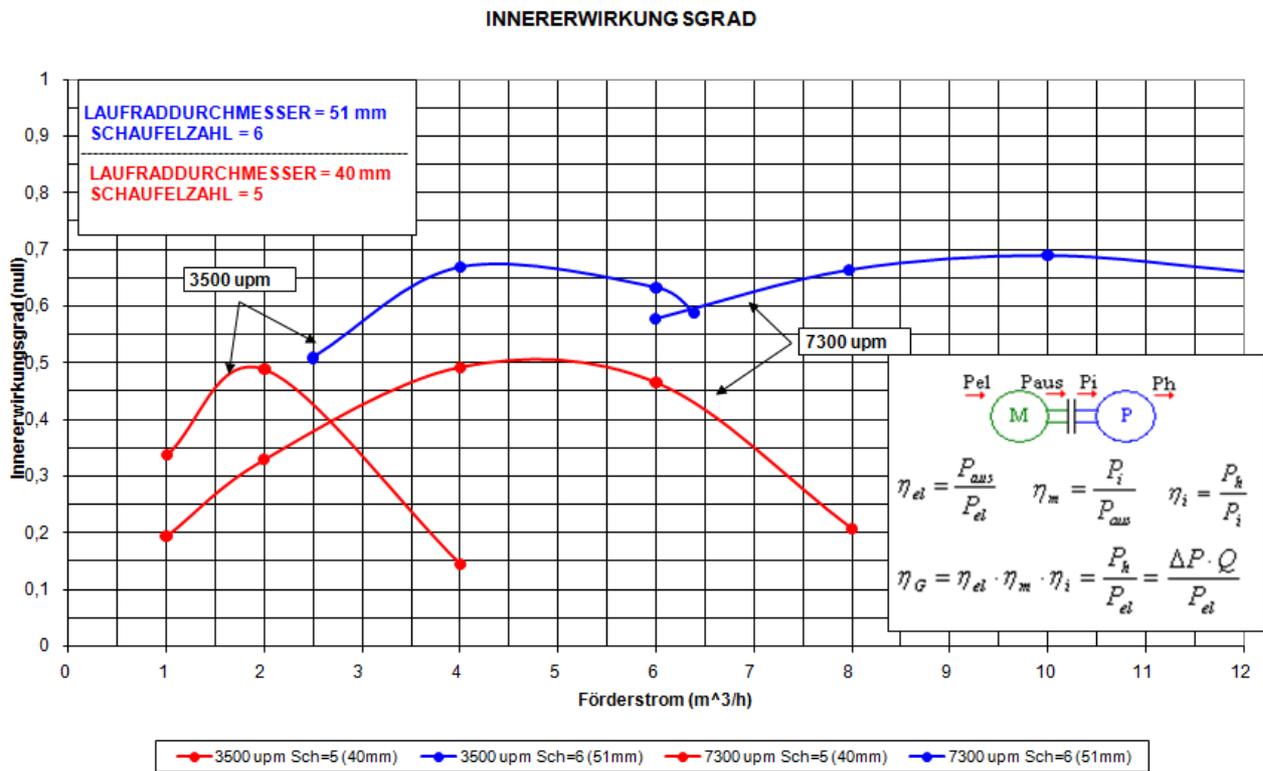


Abbildung 8: Vergleich innere Wirkungsgrade

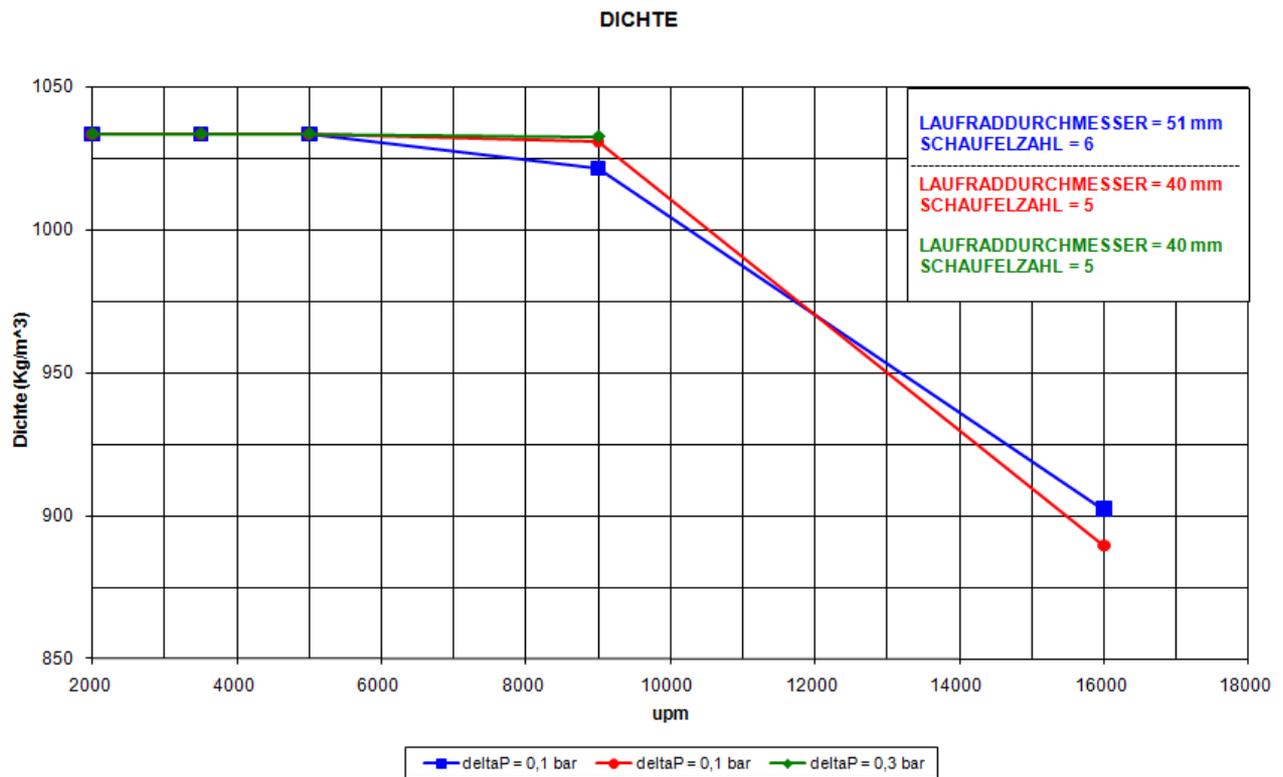


Abbildung 9: Kavitationsschaubild

Die nächste Abbildung zeigt das Pumpenrad als Hardwareteil. Es wurde als Rapid-Prototyping Verfahren in Aluguss hergestellt und anschließend mechanisch bearbeitet.



Abbildung 10: Pumpenrad, ursächlich für die Porosität der Oberfläche ist das verwendete Herstellverfahren, nicht eine eventuell auftretende Kavitation

Am Flügelrad wurden im weiteren Projektablauf keinerlei geometrische Änderungen hinsichtlich Durchmesser, Blattanzahl oder Krümmung der Blätter vorgenommen.

Die Abdichtung des Wassermantels vom inneren Gehäuse erfolgte durch eine Gleitringdichtung. Über alle drei Baustufen verhielt sich die Dichtung unauffällig.

3.1.2.2 Prüfstand

Bei der Konzeption des Prüfstandes für diese erste Baugruppe stand die Überprüfung der Ergebnisse aus Berechnung/Simulation im Fokus. Ganz bewusst wurde auf die Integration von Generator und Magnetkupplung verzichtet. Die geometrische Gestaltung des Pumpengehäuses sollte möglichst nah an dem Simulationsmodell liegen.

Als Antrieb wurde ein handelsüblicher bürstenloser DC-Motor der Fa. Plettenberg ausgewählt (HP 370). Lediglich die Wellenenden wurden für unseren Zweck angepasst. Mit diesem Motor konnten auch höhere Drehzahlen (bis 9000 UPM) erreicht werden.

Das Temperaturverhalten des E-Motors wurde messtechnisch überwacht, da der E-Motor unüblich hohen Umgebungstemperaturen bis ca. 100°C ausgesetzt wurde. Die Temperaturen am E-Motor blieben während des Betriebs unauffällig.

Der Prüfstand an sich bestand aus einem geschlossenen Kühlmittelkreislauf. Als Kühlmittel wurde ein Gemisch aus Glykol und Wasser verwendet.



Abbildung 11: Prüfstand Baustufe 1



Abbildung 12: Prüfstand mit Manometer, Thermometer, Drosselstelle, Heizstäbe

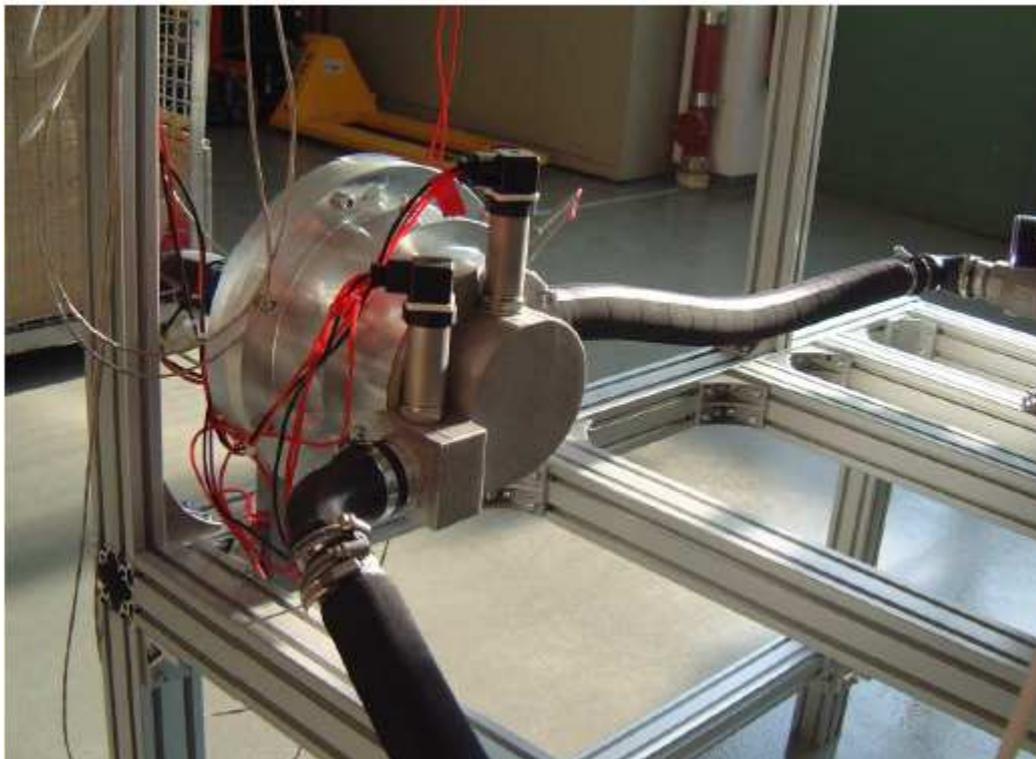


Abbildung 13: Druckmessensoren der Fa. Kobold vor und nach dem Pumpenrad



Abbildung 14: Temperatursensoren und Drehzahlmesser



Abbildung 15: Temperatursensoren und Drehzahlmesser

3.1.2.3 Ergebnisse der Baustufe 1

Die gemessenen Werte liegen nah an den berechneten. Das ist hinreichend genau, um das Konzept zu bestätigen und die nächste Baustufe zu beginnen.

Bei niedrigen Drehzahlen sind die gemessenen Werte etwas geringer, bei höheren Drehzahlen verhält es sich gegenteilig.

Das Pumpenrad wurde als Gussteil hergestellt, die Außenflächen wurden mechanisch bearbeitet um ein möglichst geringes Spaltmaß zum Gehäuse realisieren zu können. An dieser Stelle muss betont werden, dass die Geometrie der Flügelblätter filigran ist. Vermutlich entspricht die Gussgeometrie nicht ganz exakt der CAD-Geometrie. Die Abweichung (vgl. nächste Abbildung) bei niedrigen Drehzahlen vermuten wir im Flügelgrund, bei hohen Drehzahlen an den Flügelblättern.

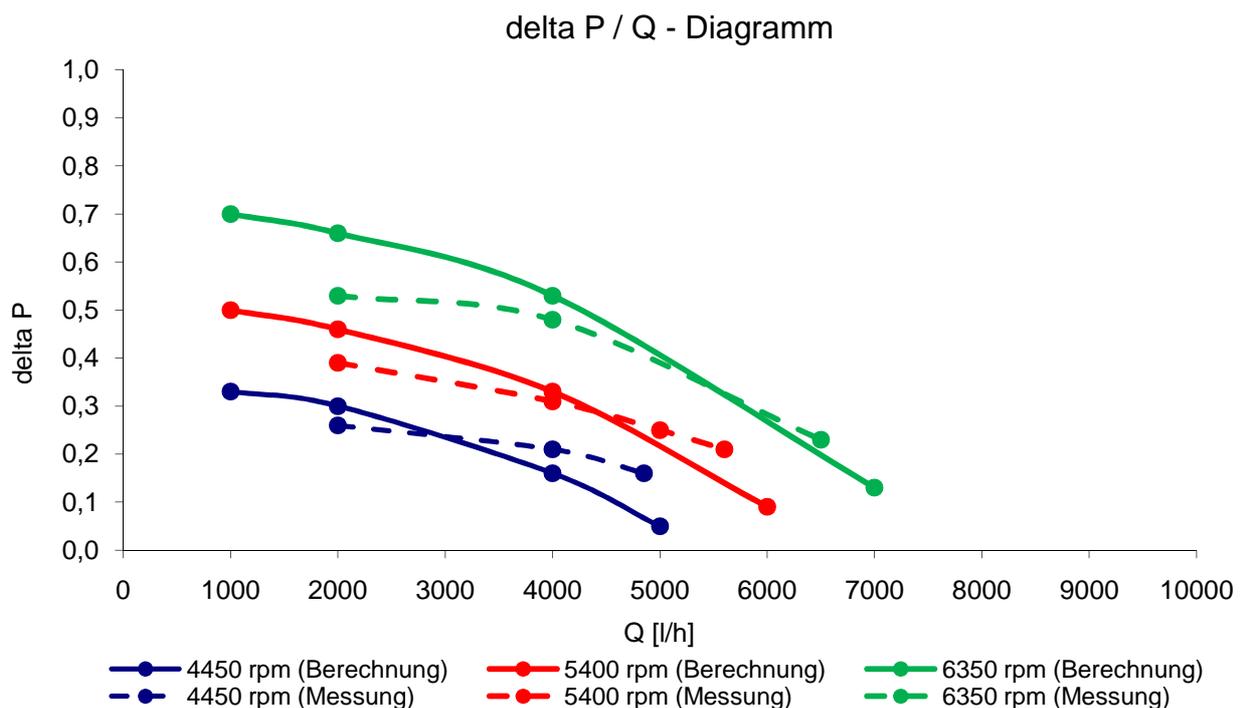


Abbildung 16: Vergleich Berechnung und Messung bei verschiedenen Leistungen

Der Auslegungspunkt unserer Pumpe liegt bei 5500l/h und 0,6 bar. Die Messungen am Prüfstand ergaben, dass dieser Punkt einer Drehzahl von 7.500 UPM und damit einer elektrischen Leistungsaufnahme von ungefähr 200 Watt entspricht.

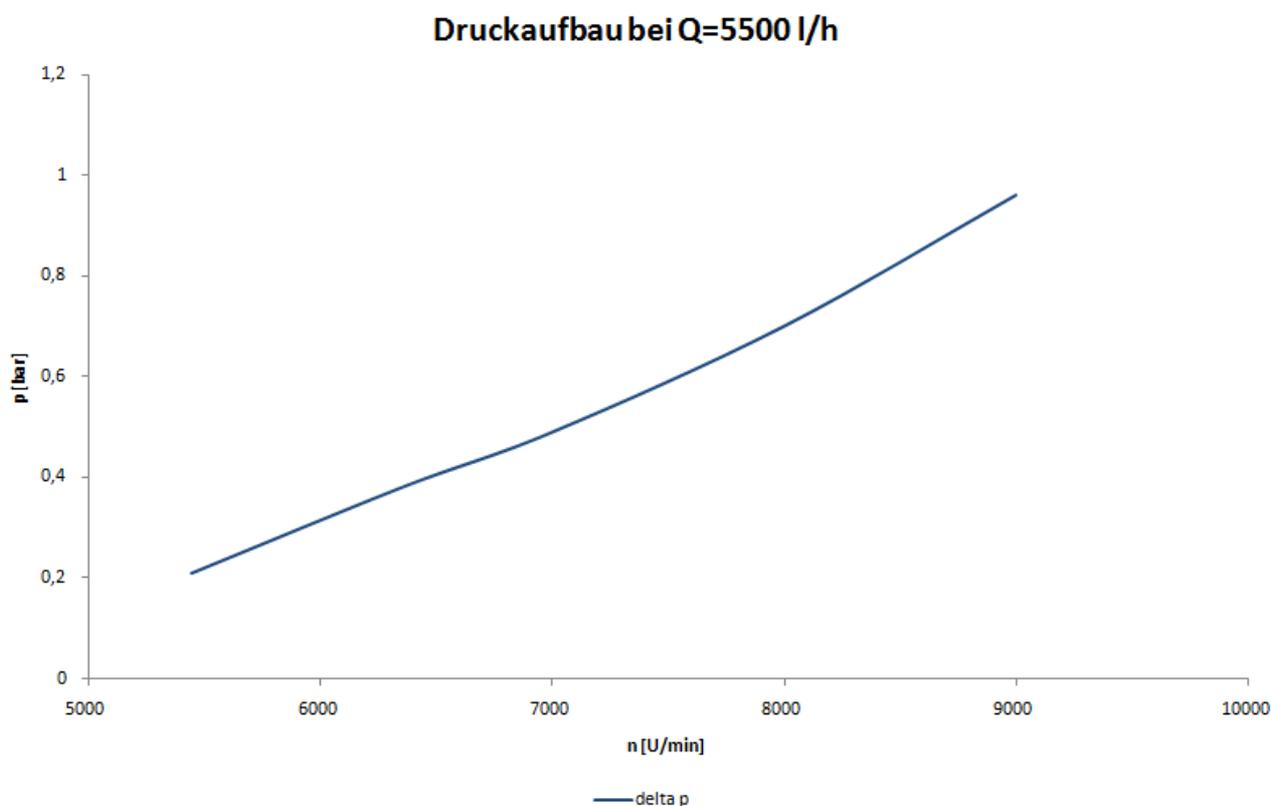


Abbildung 17: Auslegungspunkt Pumpe 5.500 l/h bei 0,6 bar

Bereits in den Anfängen des Projektes haben wir uns mit der Thematik eines möglichen Versuchsfahrzeuges beschäftigt. Da wir aufzeigen wollen, dass es möglich ist, auch mit einer wesentlich kleineren E-Wapu ein Fahrzeug zu betreiben, ist die Auswahl der Versuchsfahrzeuge begrenzt. Wir haben uns bei der Auslegung unseres Konzeptes an die CWA200 Pumpe der Fa. Pierburg orientiert.^{10, 11} Diese E-Wapu wird aktuell in BMW Fahrzeugen verbaut. Für den Teillastbereich trafen wir die sehr grobe Annahme, dass die halbe Nennleistung gleich der halben Pumpenleistung ist. Damit ergibt sich eine elektrische Antriebsleistung von 100 Watt.

Die nachfolgenden Messungen orientieren sich an diesem Wert.

¹⁰ MTZ 11/2004 Immer richtig temperiert, Thermomanagement mit elektrischer Kühlmittelpumpe, S. 883

¹¹ MTZ 11/2004 Immer richtig temperiert, Thermomanagement mit elektrischer Kühlmittelpumpe, S. 883

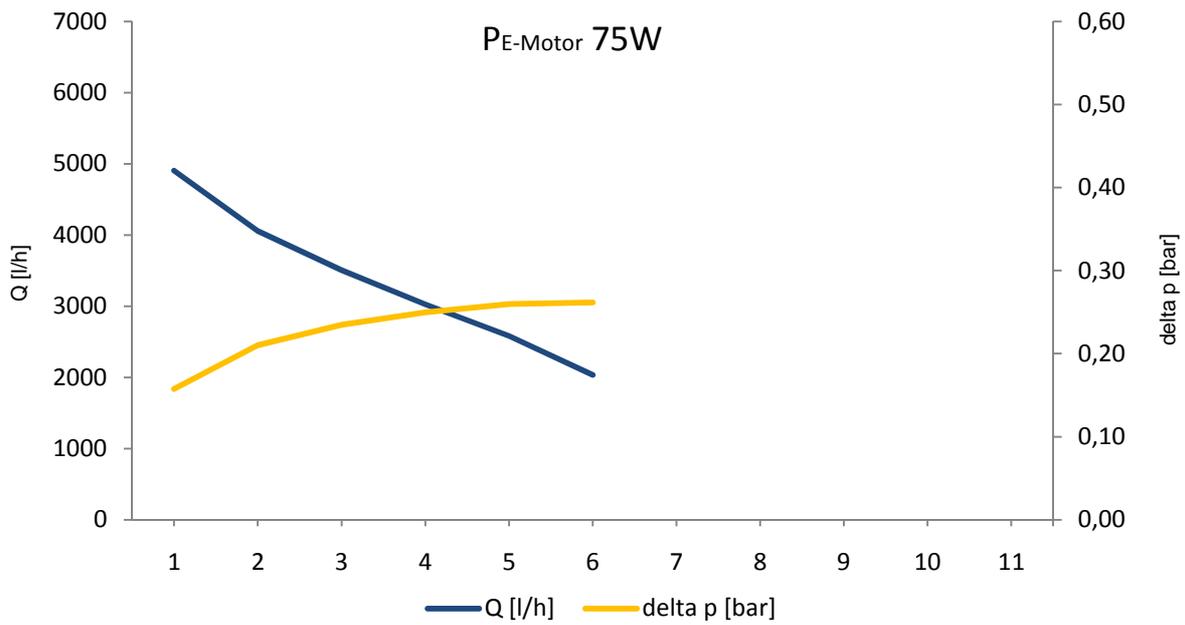


Abbildung 18: 75 Watt elektrische Leistung, ca. 4500 UPM

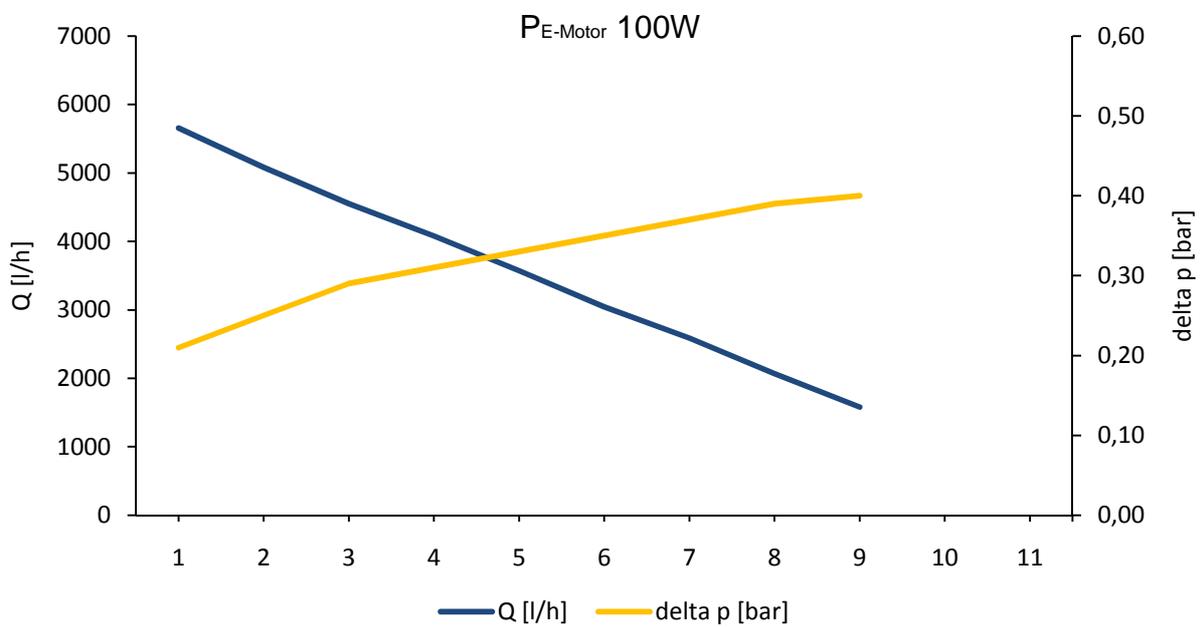


Abbildung 19: 100 Watt elektrische Leistung, ca. 5300 UPM

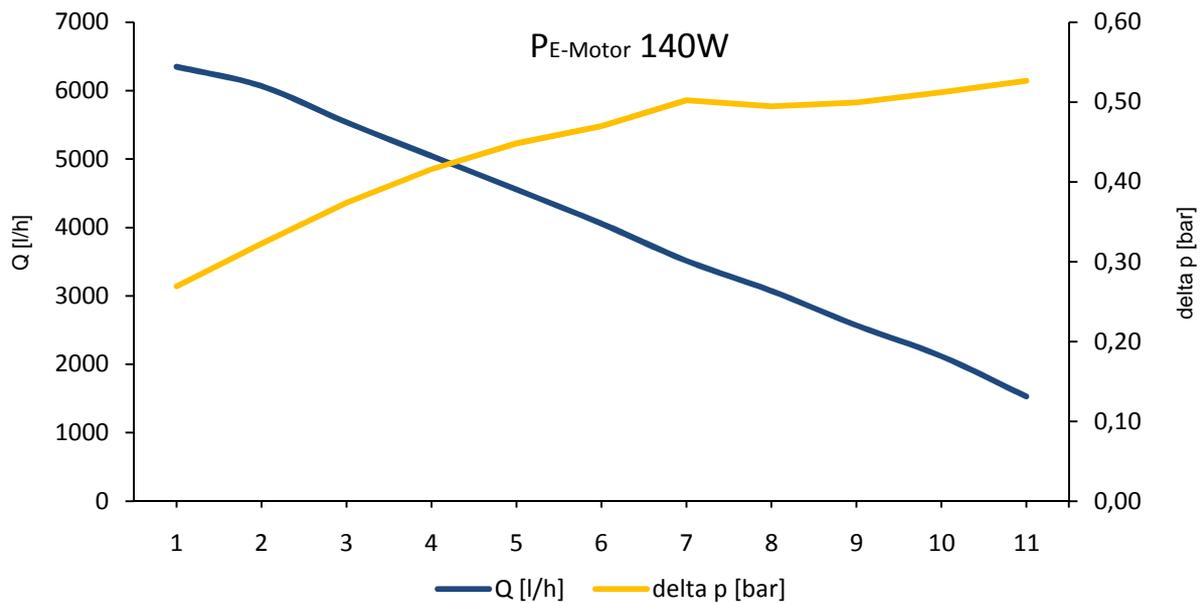


Abbildung 20:140 Watt elektrische Leistung, ca. 6350 UPM

3.2.2 Baustufe 2

3.2.2.1 Auslegung

Schwerpunkt dieser Baustufe war die Integration der Magnetkupplung und des Generators in die Baugruppe.

Zurzeit gibt es zwei Anbieter von wassergekühlten Generatoren. Es sind dies die Firmen Bosch und Valeo. Wir entschieden uns aus Gründen der Geometrie und des Aufbaus für den Bosch Generator. Es handelt sich hierbei um einen schleifringlosen Leitstückläufer mit einer Leistung von 150A. Dieser wird in verschiedenen Fahrzeugen bei Audi, BMW, Mercedes-Benz und Porsche eingesetzt.

Bild 10

- 1 Riemenscheibe
- 2 Gleichrichter
- 3 Regler
- 4 Antriebslagerschild
- 5 Generatorgehäuse (Aluminiumtopf)
- 6 Kühlflüssigkeitsmantel
- 7 Einschubgehäuse für Motoranbau bzw. Motorgehäuse
- 8 feststehende Erregerwicklung
- 9 Ständerpaket
- 10 Ständerwicklung
- 11 Leitstückläufer
- 12 unmagnetischer Zwischenring
- 13 Leitstück

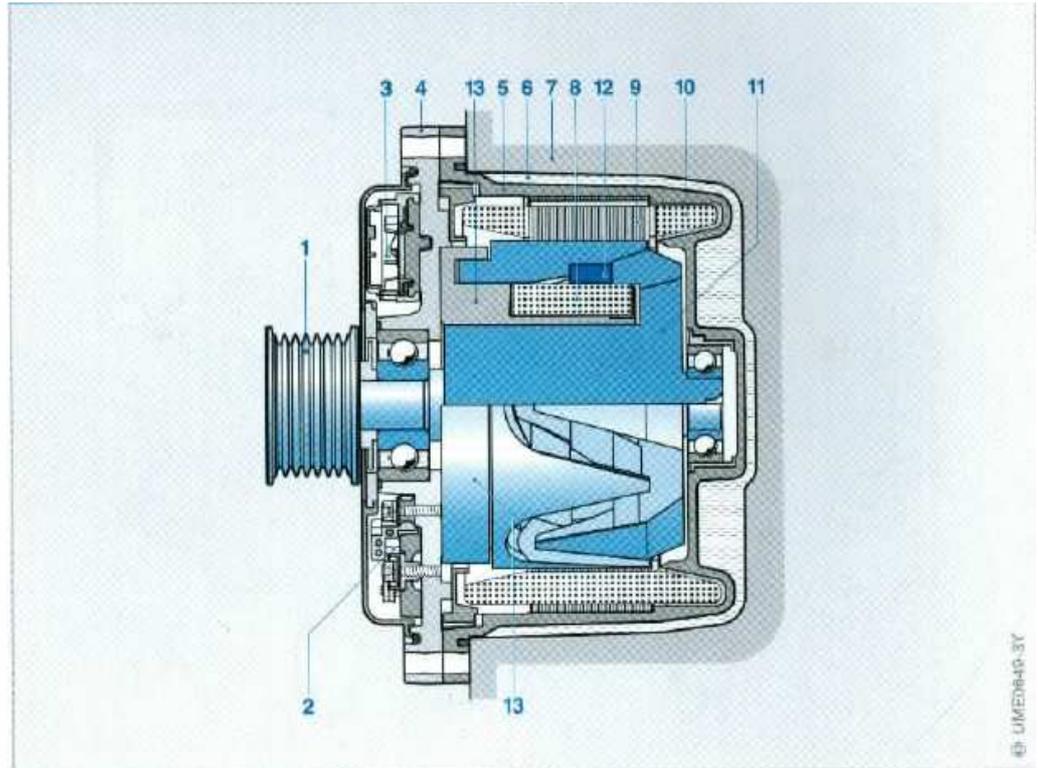


Abbildung 21: der verwendete Generator im Schnitt,
Quelle: Robert Bosch GmbH

Ursprünglich war geplant, einen luftgekühlten Generator auf Wasserkühlung umzubauen. Nach gründlicher Analyse und Aufwandsabschätzung entschlossen wir uns einen handelsüblichen wassergekühlten Generator umzubauen. Dazu wurde das Gehäuse des Generators auf der Rückseite (gegenüber der Anschlussseite) aufgefräst. In die dann sichtbare Generatorwelle wurde ein Passsitz eingebracht. Mit dessen Hilfe konnte die Generatorwelle verlängert werden. Am verlängerten Ende befindet sich eine Verzahnung um das Drehmoment zu übertragen. Mit dieser Auslegung ist es möglich, bei Montage und Demontage den Generator mit der verlängerten Welle als separate Einheit einfach ein- und auszubauen. Es wurde sozusagen ein Einschubgehäuse um den Generator konstruiert. Die Verzahnung bietet zudem die Möglichkeit, Fertigungstoleranzen in axialer Richtung auszugleichen.



Abbildung 22: der Generator nach dem Umbau

Klimakompressoren in Fahrzeugen besitzen eine Magnetkupplung, um je nach Anforderung den Kompressor zuzuschalten. Für unser Projekt wurde die Magnetkupplung eines Klimakompressors der Fa. Denso verwendet. Diese wurde an einigen Stellen mechanisch bearbeitet, um für den speziellen Anwendungsfall nutzbar zu sein. Von ihrer grundsätzlichen Auslegung her, ist diese Magnetkupplung für unseren Anwendungsfall überdimensioniert, da bei Klimakompressoren ein wesentlich höheres Drehmoment übertragen wird. In unserem Projekt liegt die Leistungsaufnahme der Magnetkupplung bei ca. 3 Volt und 1 Ampere.

In einer ersten konstruktiven Auslegung wurde die Magnetkupplung auf der E-Motorseite integriert und die Kupplungsscheibe auf der Generatorseite (siehe

Abbildung 16). Die Kupplungsscheibe ist auf der verlängerten Generatorwelle axial beweglich. Ist der Generator in Betrieb, baut sich im Inneren ein Magnetfeld auf. Dieses Magnetfeld magnetisiert dabei auch die verlängerte Generatorwelle. Dadurch wird, die an sich axial bewegliche, Kupplungsscheibe festgehalten. Die Magnetkupplung ist wirkungslos. Dieses Konzept des Ein- und Auskuppelns führte somit nicht zum Ziel.

Das Problem wurde aber dadurch gelöst, dass Kupplungsscheibe und Magnetkupplung ihre Plätze tauschten, d.h. die Magnetkupplung befindet sich nun auf der Generatorseite und die Kupplungsscheibe auf der E-Motorseite. Nunmehr funktionierte das Ein- und Auskuppeln problemlos.

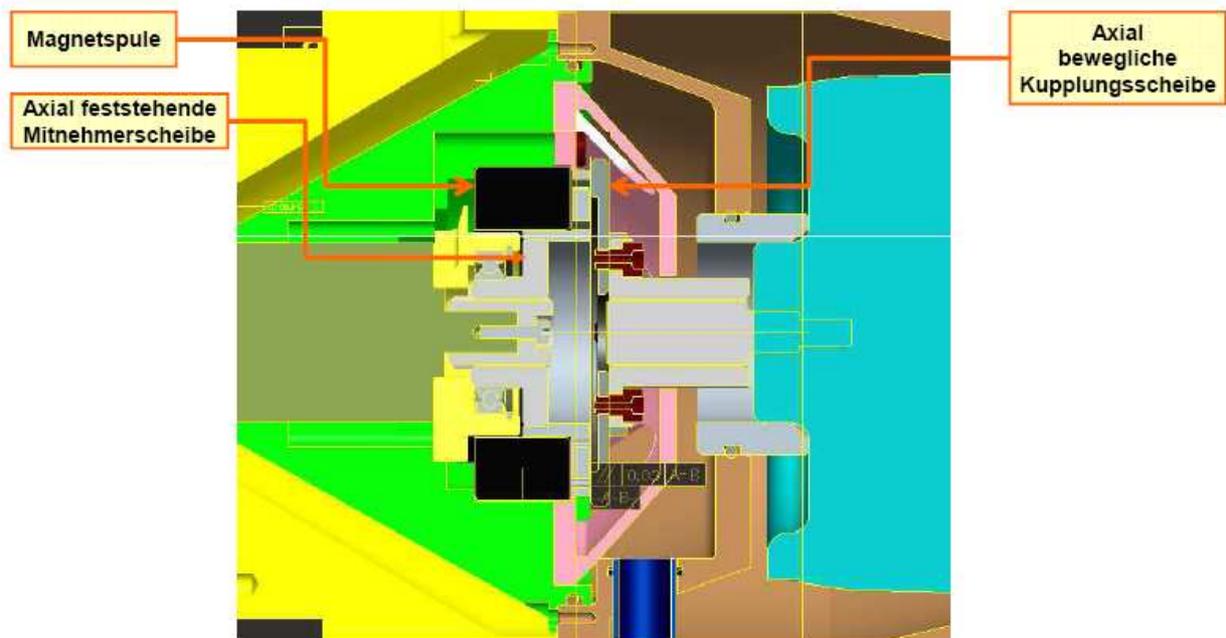


Abbildung 23: Magnetkupplung auf E-Motorseite

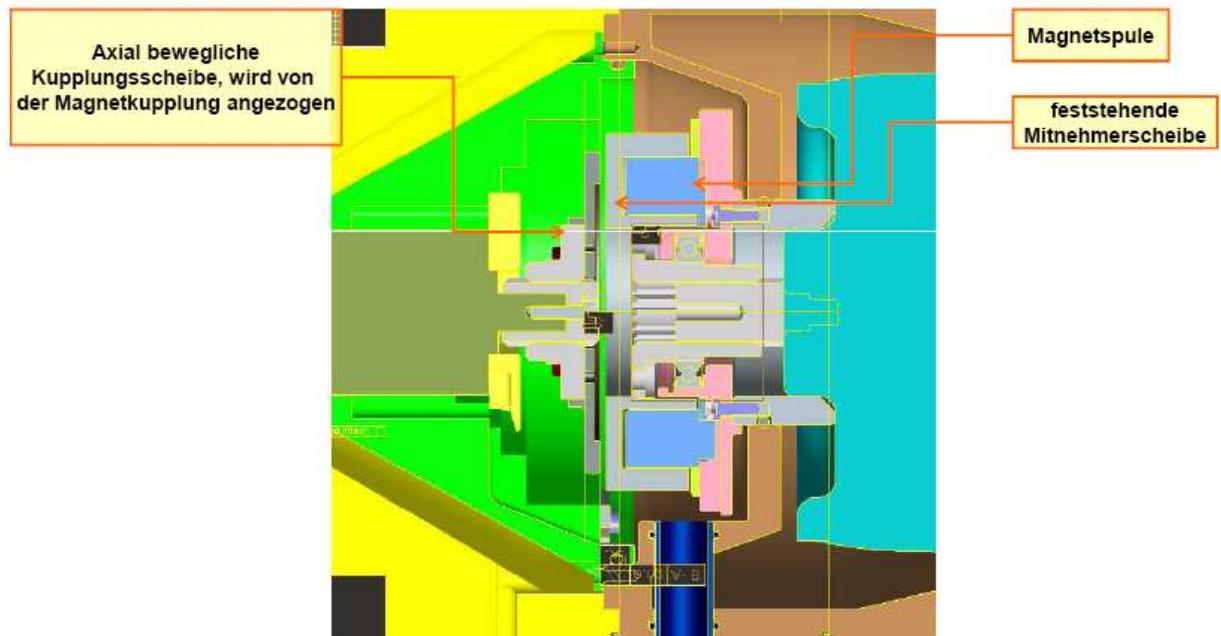


Abbildung 24: Magnetkupplung auf Generatorseite

3.2.2.2 Prüfstand

Der bestehende Prüfstand wurde den Erfordernissen der Baugruppe entsprechend hochgerüstet. Als Antrieb für den Generator diente ein 7,5 kW starker Elektromotor. Um hohe Drehzahlen darstellen zu können (bis 18.000 UPM), kam ein Riementrieb mit 6facher Übersetzung zum Einsatz.

Der Generator konnte mit vier Lastwiderstandsgruppen belastet werden. Diese können einzeln zugeschaltet werden. Der gesamte Kühlkreislauf wurde zudem galvanisch vom übrigen Montagegestell getrennt.



Abbildung 25: Ansicht Prüfstand Baustufe 2

„Adaptiertes Bierfass mit Heizung und Isolation“, Thermometer, Sicherheitsventil, Absperrhahn als Drosselstelle, Druckluftanschluss, Durchflussmesser, Druckmesser vor und nach Pumpe, Temperaturmesser im Pumpengehäuse, 7,5 KW E-Motor mit Riementrieb zur Darstellung von Drehzahlen bis 18.000 UPM, 150A Generator, Lastwiderstände, galvanische Trennung des Wasserkreislaufes vom Prüfstandsrahmen

3.2.2.3 Ergebnisse

Das Ein- und Auskuppeln war nach der Konzeptänderung problemlos möglich. Die Kupplungsversuche erfolgten über ein Drehzahlband von 6.000 bis 18.000 UPM. Die Zuschaltung der Magnetkupplung wurde über einen einfachen Kippschalter gesteuert. Ein langsames Anpassen der Drehzahlen war nicht erforderlich. Um eine möglichst große mechanische Belastung zu erzielen, drehte sich die Welle des E-Motors (Pumpenrad) nicht und wurde dann bei Drehzahlen bis 18.000 UPM eingekuppelt. Die Drehzahlanpassung erfolgte an dieser Stelle sofort.

Eventuell erwartete Druckspitzen bei den Kupplungsversuchen auf der Druckseite der Pumpe konnten wir nicht feststellen. Durch die plötzliche Drehzahländerung und damit verbundene Volumenstromänderung kann es auf der Saugseite zu Kavitation gekommen sein.

Der Generator verhielt sich bei allen Versuchsreihen unauffällig. Da er sozusagen im Hauptkühlkreislauf integriert ist, wird er mit einem vielfachen des erforderlichen Volumenstromes gekühlt - bezogen auf seine Verlustleistung, siehe auch Abbildung 2.

Die gemessenen Werte von Volumenstrom und Druckaufbau im E-Wapu Betrieb liegen unter denen von Baustufe 1. Ursächlich dafür ist der höhere Druckverlust im Wassermantel.

Bei einer aufgenommenen elektrischen Leistung von 100 Watt ergibt sich bei einem Volumenstrom von 2000 l/h jetzt noch ein Δp von 0,31 bar (statt 0,39), bei 3500 l/h von 0,25 bar (statt 0,33) und bei 5000 l/h 0,1 bar (statt 0,25).

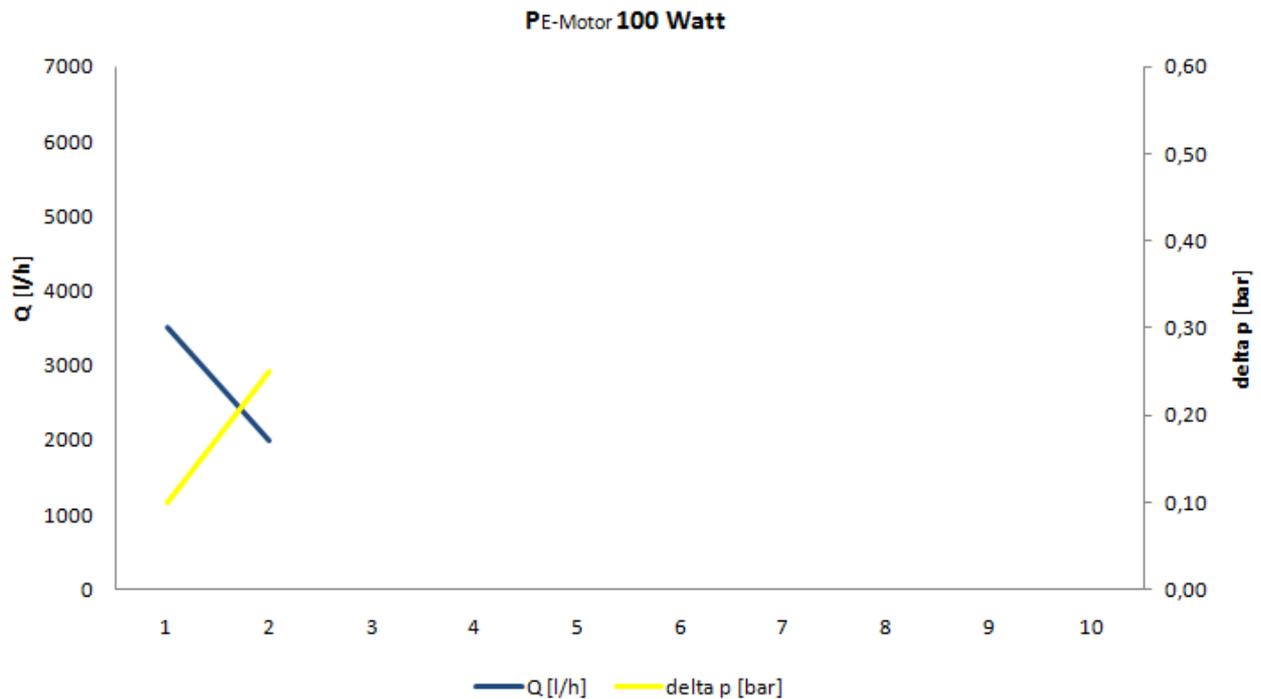


Abbildung 26: 100 Watt elektrische Leistung

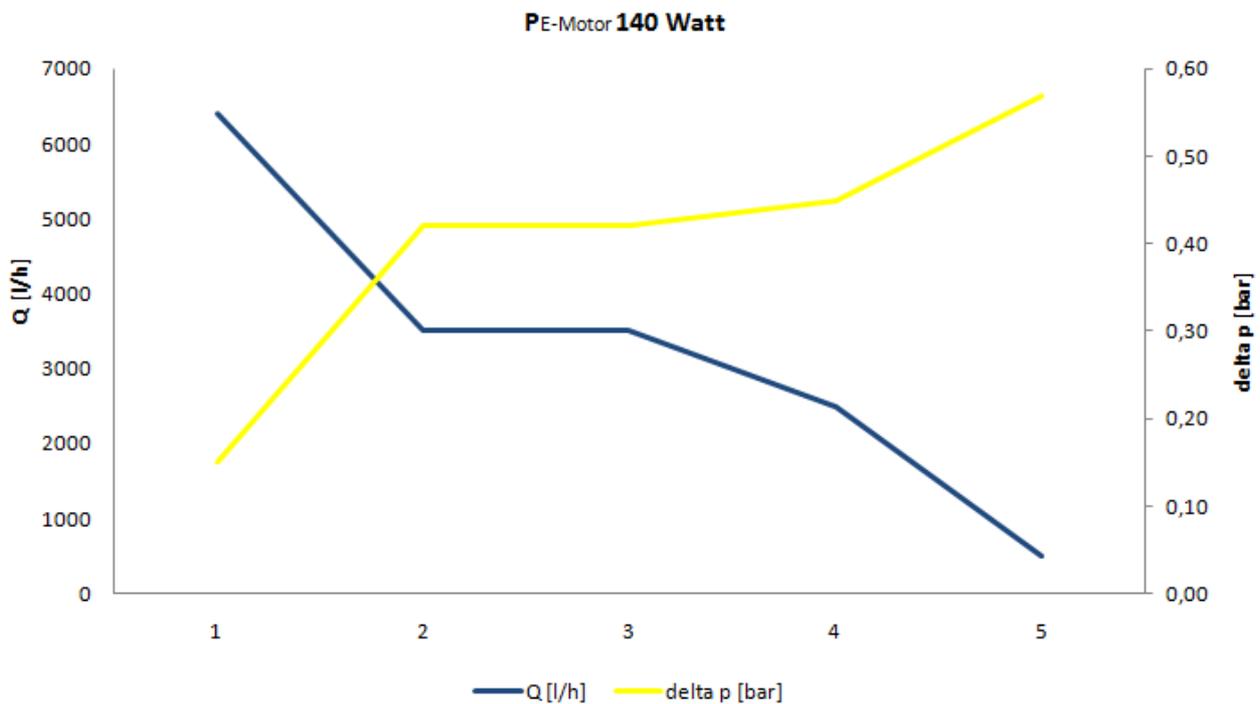


Abbildung 27: 140 Watt elektrische Leistung

Eine Herausforderung bei unserem Konzept ist die Drehzahlstreuung. Einerseits soll die Pumpe im E-Wapu Betrieb sehr effizient sein, andererseits bei hohen Drehzahlen und der dann auftretenden Kavitation einen ausreichend großen Volumenstrom und Druck bereitstellen. Laut unserer Berechnung tritt Kavitation bei Drehzahlen ab 9.000 UPM auf. Diesen Wert konnten wir auf dem Prüfstand bestätigen. Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass der Volumenstrom ab 9.000 UPM nicht mehr ansteigt. Wichtig ist auch, dass der Volumenstrom nie unter die 5.500 l/h fällt.

Damit haben wir einen guten Kompromiss in der Auslegung für die beiden Betriebsbereiche gefunden.

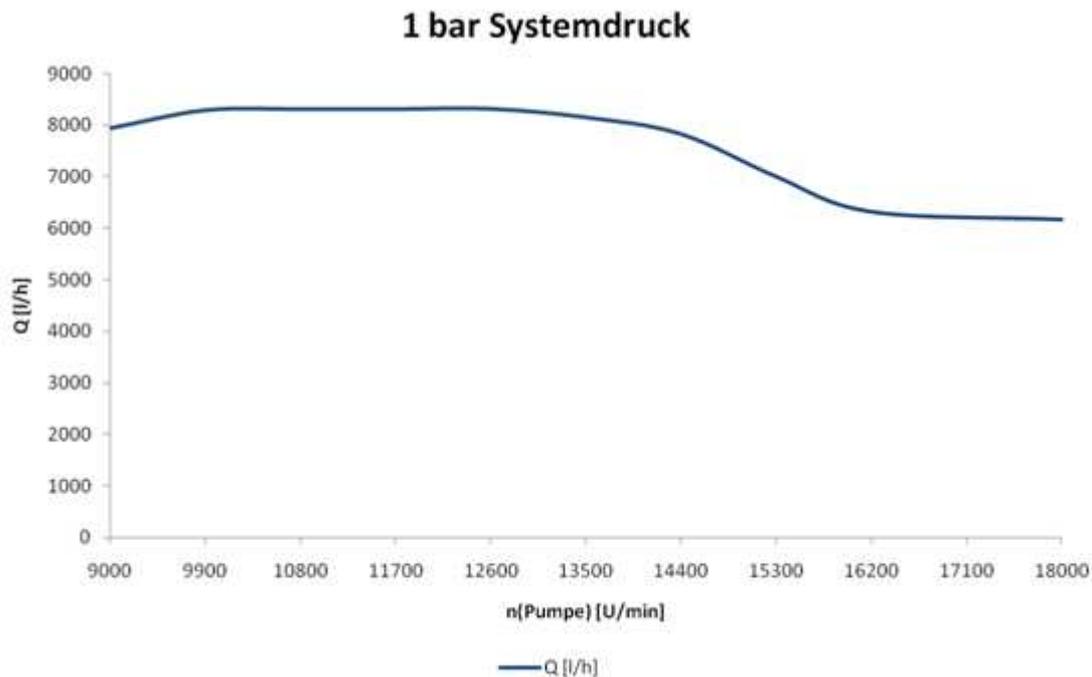


Abbildung 28: Verlauf Volumenstrom bei höheren Drehzahlen

3.2.3 Baustufe 3

3.2.3.1 Das Versuchsfahrzeug

Schwerpunkt der Baugruppe 3 war der Aufbau eines funktionstüchtigen Prototypen und dessen Einsatz in einem repräsentativen Fahrzeug. Eine große Herausforderung war die Integration des Prototypen in ein bestehendes Fahrzeug. Aktuelle Fahrzeuge haben eine hohe Packagedichte im Motorraum.

In die engere Fahrzeugauswahl kamen VW Golf 5, Ford Focus und BMW1er. Die ersten beiden Fahrzeuge schieden aus, weil deren Packageanordnung im Motorraum nicht unseren Anforderungen genügte.

Beim BMW 1er entschieden wir uns für einen Reihensechszylinder, weil dieser nach dem Ausbau von nicht zwingend benötigten Komponenten grundsätzlich genügend Bauraum bieten würde (Alles vor dem Hintergrund, den Pumpenprototypen in ein bestehendes Fahrzeug zu integrieren). Hinzu kam, dass dieses Fahrzeug über eine serienmäßige E-Wapu als Hauptkühlmittelpumpe verfügt.

Nach dem Ausbau von Klimakompressor und der nicht mehr benötigten serienmäßigen E-Wapu hatten wir den benötigten Bauraum. Allerdings befindet

sich dieser Bauraum auf der „heißen Seite“ des Motors, also auf der Auslassseite. Der Einbauort für unseren Prototypen befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Abgaskrümmern. Aus Vorsicht vor den dort herrschenden hohen Temperaturen integrierten wir eine Temperaturmessstelle auf unseren Prototypen. Erste Fahrten bei sommerlichen Temperaturen zeigten, dass die Temperaturen dort aber in einem unkritischen Bereich liegen.

Vor dem Einbau des Prototyps war es für uns jedoch wichtig, dass serienmäßige Kühlsystem des Fahrzeugs zu verstehen. Speziell waren wir daran interessiert, wie sich der Volumenstrom bei steigenden Lasten ändert und sich dadurch Rückschlüsse auf unser Konzept ergeben. Zu diesem Zweck bauten wir einen Durchflussmesser ins Fahrzeug ein und passten die Verschlauchung an. Dass sich durch den Durchflussmesser und der Verschlauchung ein höherer Druckverlust im Kühlsystem ergibt, soll an dieser Stelle erwähnt werden. Wir halten den zusätzlichen Druckverlust aber vernachlässigbar. Mit dem umgebauten Fahrzeug fuhren wir auf den Rollenprüfstand zur Fa. Alpina in Buchloe. Die Testreihen wurden nach einem von uns durchgeführten Fahrprofil durchgeführt. Über einem Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 160 km/h wurde einmal in der Ebene, einmal bei 5% Steigung und einmal bei 10% Steigung gleichmäßig gefahren. Die Abstufung erfolgte dabei in 10 km/h Schritten. Es wurde immer ausreichend lange in dieser Geschwindigkeit verharrt, um dem Motormanagement Zeit zu geben sich einzuregulieren. Jedes Fahrprofil (Ebene, 5% und 10%) wurde dreimal durchfahren.

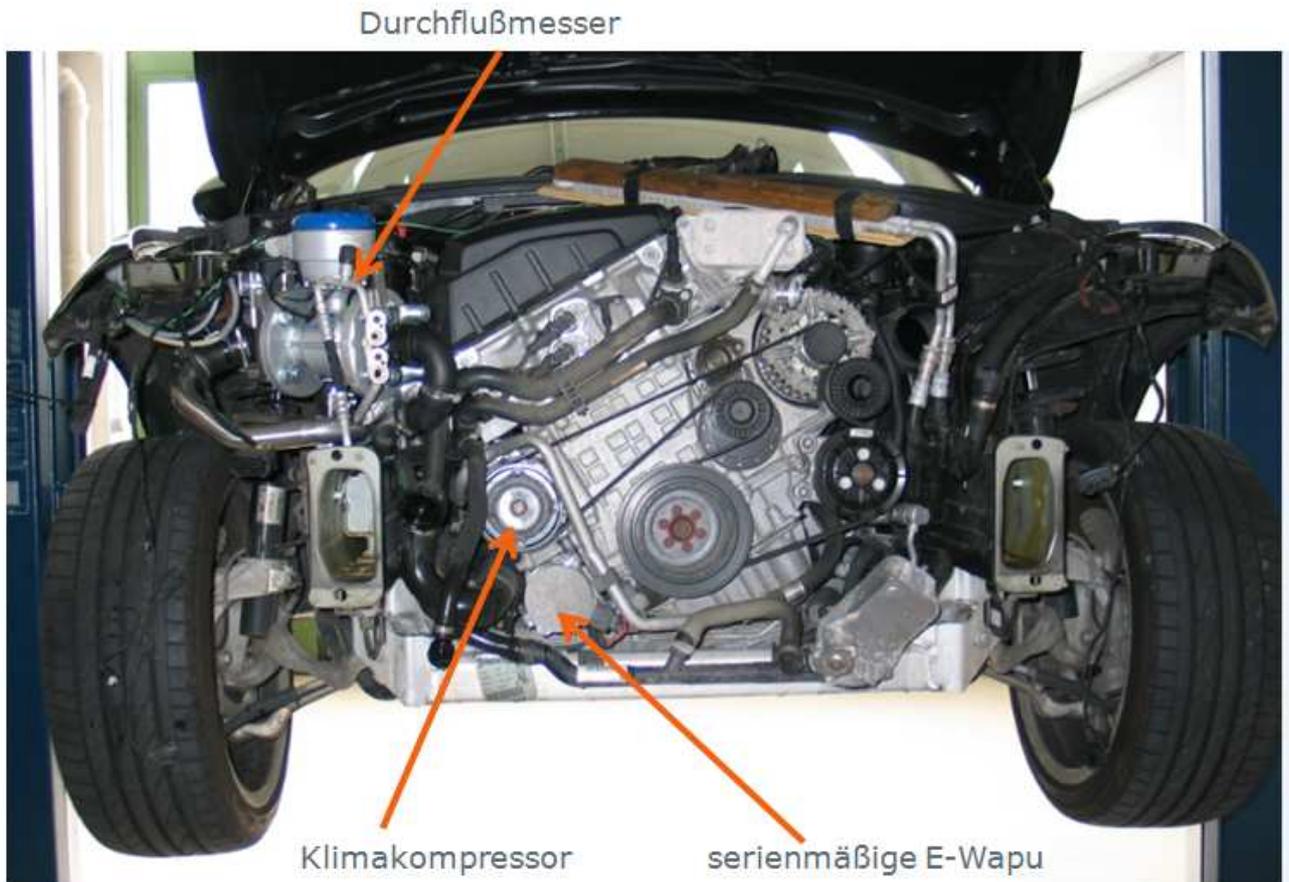


Abbildung 29: Das umgebaute Versuchsfahrzeug für die Messung auf dem Rollenprüfstand

3.2.3.2 Der Prototyp und sein Einbau ins Fahrzeug

Da die geometrischen Gegebenheiten im Fahrzeug fix waren, musste gegenüber der Baustufe 2 die Länge reduziert werden. Eine nochmalige konstruktive Überarbeitung des Konzeptes brachte dann die gewünschte Verkürzung. Der von uns in dieser Baugruppe verwendete E-Motor baut deutlich kürzer. Das wurde dadurch erreicht, dass der E-Motor bereits für unsere Anwendung optimiert wurde. Dabei wurde der Motor in ein von uns vorgegebenes Gehäuse integriert.

Weitere Verkürzungen der Baulänge wurden durch eine kürzere Anströmung des Pumpenrades sowie einer geänderten geometrischen Integration der Magnetkupplung erreicht.

Pumpenrad, Pumpendeckel (Schnecke) und das Außengehäuse sind aus Aluminiumguss hergestellt worden. Besonders bei der filigranen Geometrie des

Pumpenrades hat sich dieses Verfahren als grenzwertig erwiesen. Beim Außengehäuse zeigte sich nach der mechanischen Bearbeitung in einigen Bereichen viel Lunker. Mangels Alternativen (Lieferanten) und Zeit wurden diese Bereiche von uns selbst repariert.

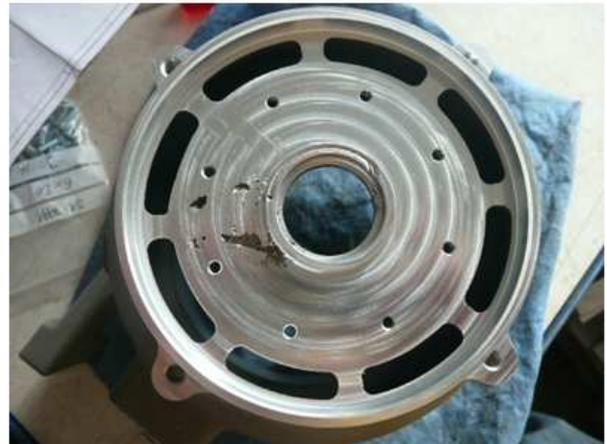


Abbildung 30: Lunker im Außengehäuse

In den Messergebnissen der Baustufe 2 wurde bereits festgestellt, dass die gemessenen Werte unterhalb der Werte der Baustufe 1 liegen. Ursächlich dafür ist ein größerer Druckverlust im Wassermantel. Für die Baustufe 3 sollte dieser Druckverlust verkleinert werden. Optimiert wurden die Einströmung in das Gehäuse sowie die Anströmung des Pumpenrades. Große Querschnittsprünge wurden vermieden, Kanten entsprechend verrundet. Durch diese Detailarbeit konnte der Druckverlust im Wassermantel wesentlich verkleinert werden, wie nachfolgende Simulation zeigt.

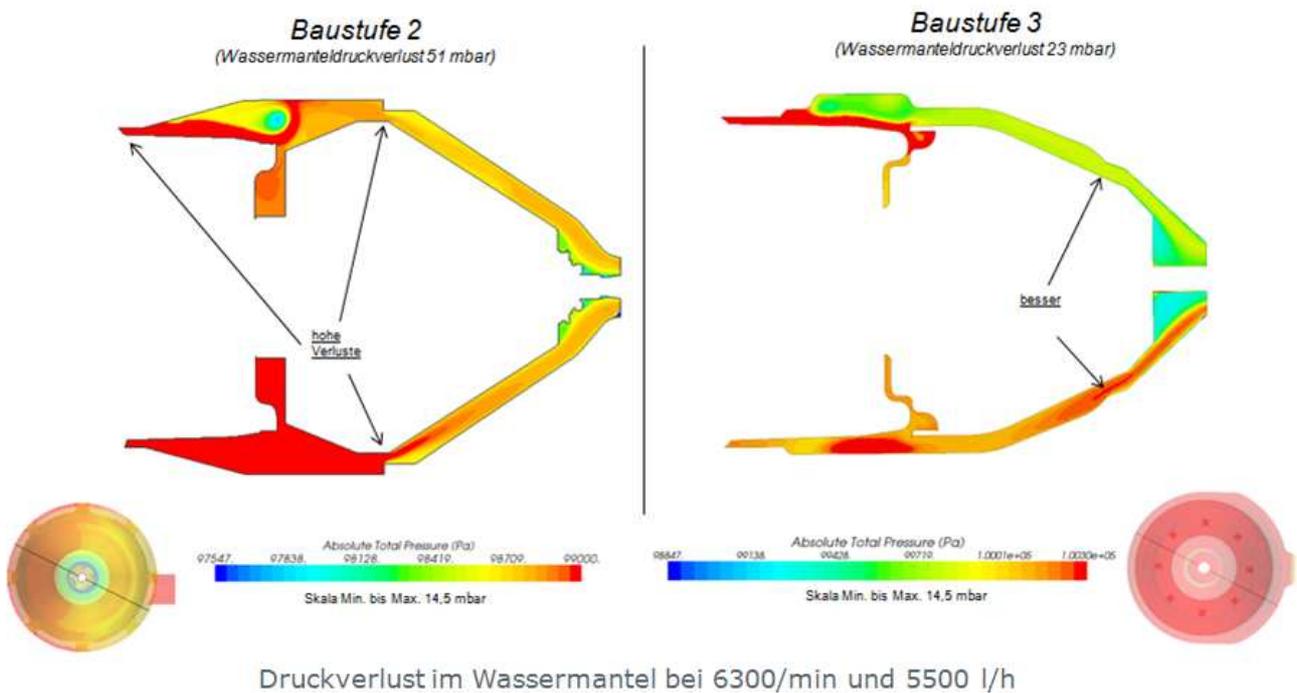


Abbildung 31: Simulation Druckverlust im Wassermantel

Einbauort für den Prototypen im Fahrzeug war in etwa dort, wo sich davor der Klimakompressor und die serienmäßige E-Wapu befanden. Der Prototyp wurde starr am Kurbelgehäuse verschraubt.

Mit einer zusätzlichen Umlenkrolle konnte ein funktionierendes Riementriebslayout gefunden werden.

Das Thermostat wurde mit einem adaptierten Halter am Vorderachsträger befestigt.

Die Verschlauchung der einzelnen Komponenten war sehr anspruchsvoll. Mit aus einzelnen Rohrstücken zusammengeschweißten Edelstahlrohren wurde in mühevoller Kleinarbeit eine funktionierende Lösung gefunden. Die Optimierung hinsichtlich Druckverlust war in dieser Stelle sekundär.



Abbildung 32: Prototyp Baustufe 3, einbaufertig für das Fahrzeug



Abbildung 33: Der eingebaute Prototyp im Fahrzeug

3.2.3.3 Ergebnisse

Die Messungen des serienmäßigen Kühlsystems auf dem Rollenprüfstand brachten sowohl erwartete als auch überraschende Ergebnisse.

Erwartet (daher bekannt) waren die unterschiedlichen Betriebsstrategien¹². Das Fahrzeug war mit 2 Personen besetzt, die Temperatur betrug ca. 25°C. Eine Überraschung gab es beim Verlauf des Volumenstromes über die Geschwindigkeit.

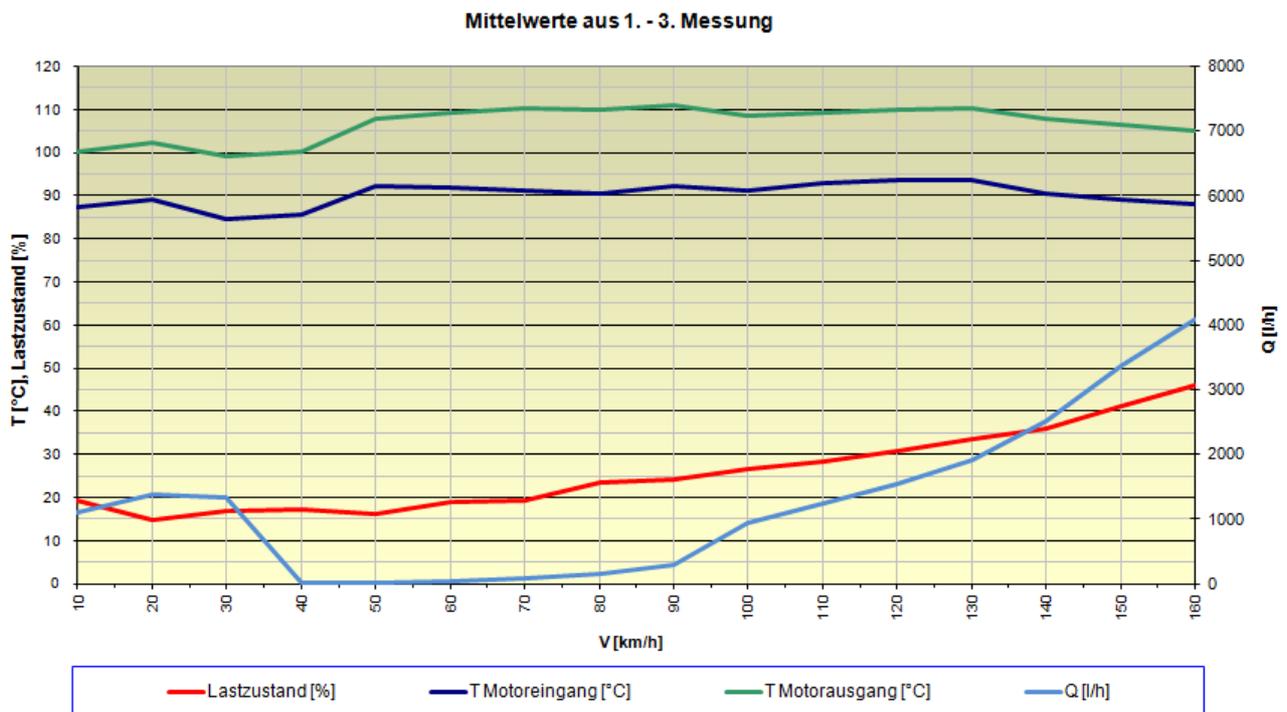


Abbildung 34: Messung Rollenprüfstand 0% Steigung

Bei Betrachtung der Temperaturverläufe ist sehr deutlich zu erkennen, dass es ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h bis etwa 130 km/h zu einer Anhebung der Kühlmitteltemperaturen kommt. Dies wird durch eine Reduzierung des Volumenstromes in kurzer Zeit erreicht.

Zwischen 40 und 90 km/h gibt es keinen nennenswerten Volumenstrom. Das war überraschend. Der Fahrtwind, der durch den Kühler in den Motorraum eintritt, ist anscheinend für solche Lasten ausreichend. Damit deckt sich die Messung mit den Informationen aus den MTZ-Artikeln. Ab 90 km/h beginnt der Volumenstrom wieder zu steigen.

¹² MTZ 11/2005 Das Wärmemanagement des neuen BMW Reihensechszylindermotors, Bild 5

Die Messung des Volumenstromes für die Fahrprofile 5% und 10% Steigung war leider nicht möglich. Vermutlich wurde durch das Ausgasen des Kühlmittels (Gasbläschen) der Durchflussmesser gestört. Die angezeigten Werte sind ein Rauschen auf hohem Niveau. Die serienmäßige E-Wapu ist leistungsmäßig nicht in der Lage einen so hohen Volumenstrom zu liefern¹³. Der Vollständigkeit halber werden die Messungen hier dargestellt.

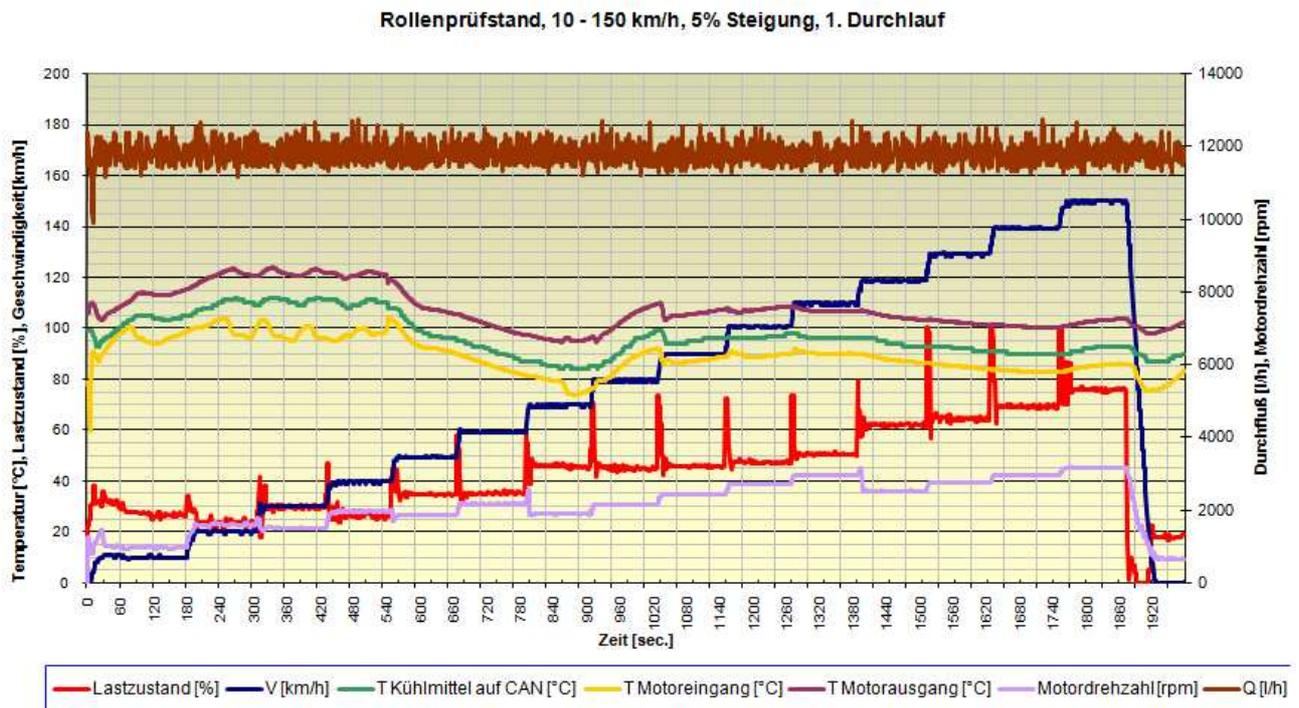


Abbildung 35: Messung Rollenprüfstand 5% Steigung

¹³ Fa. Pierburg: Elektrische Kühlmittelpumpen, immer richtig temperiert

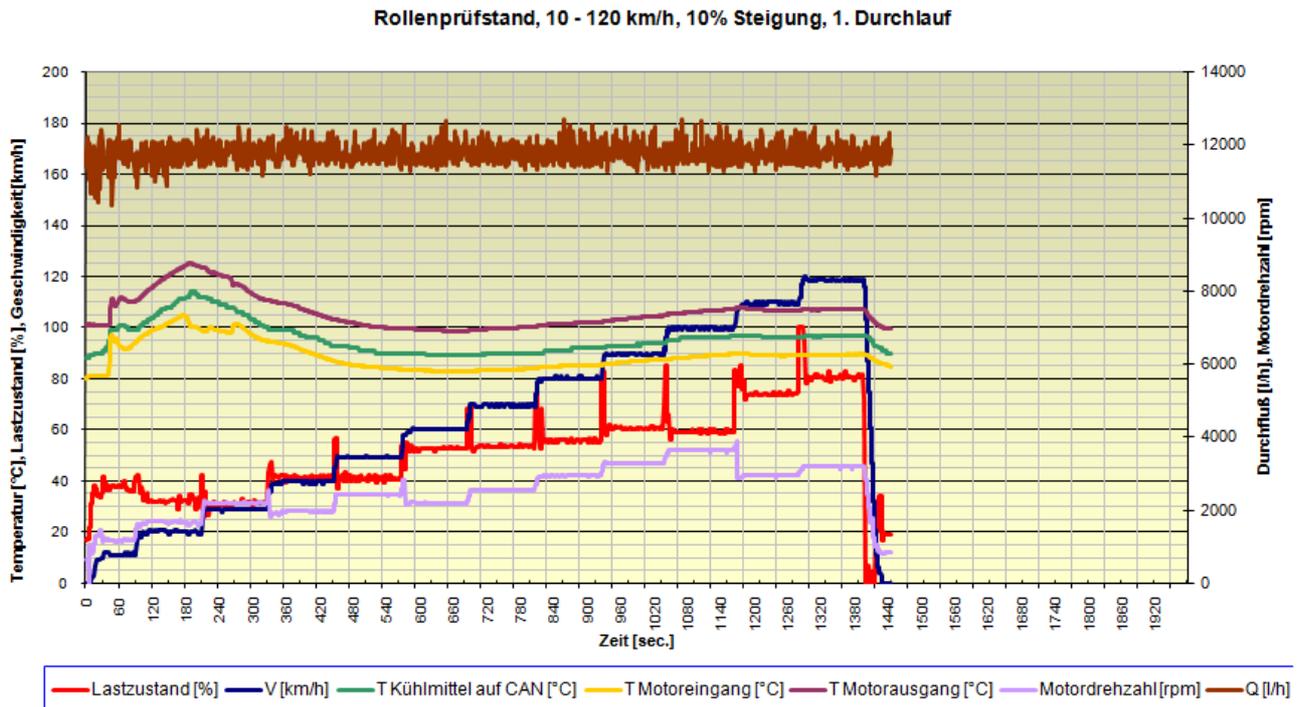


Abbildung 36: Messung Rollenprüfstand 10% Steigung

Nach dem Einbau des Prototypen ins Fahrzeug wurde eine Messreihe im E-Wapu Betrieb aufgenommen.

Schon frühzeitig im Projekt trafen wir die Annahme, dass ein E-Motor mit einer aufgenommenen elektrischen Leistung von 100 Watt für dieses Fahrzeug im Teillastbereich ausreichen würde. Deshalb konzentriert sich die Messreihe um diese besagte Leistungsaufnahme.

Mit diesen 100 Watt aufgenommene Leistung stellt sich ein Volumenstrom von ungefähr 3000 l/h ein.

Es ist nicht bekannt, inwieweit die Leistungskurve vom Verbrennungsmotor mit der Leistungskurve der serienmäßigen E-Wapu korreliert. Auch unklar ist, ob die 3000l/h Volumenstrom wirklich vom Motor gebraucht werden oder sie überdimensioniert sind. Letzteres vermuten wir, da die serienmäßige elektrische Pumpe maximal 7500 l/h Volumenstrom fördern kann, der Motor jedoch bei 140km/h mit schätzungsweise 40 kW belastet wird.

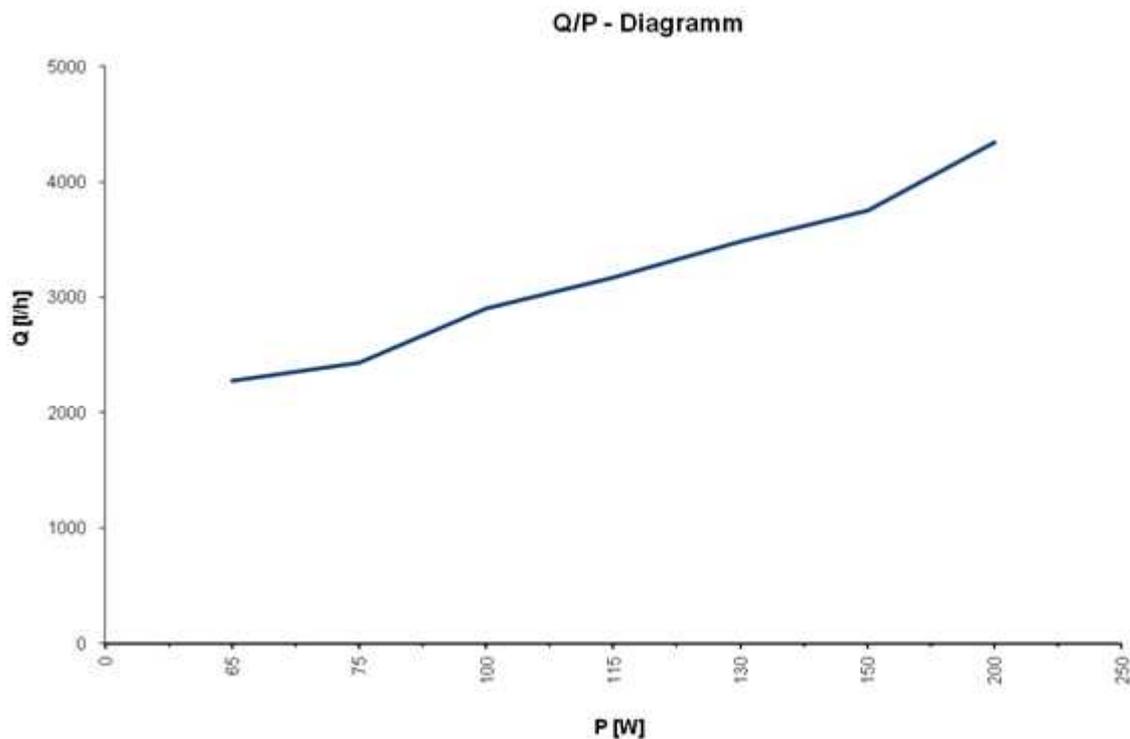


Abbildung 37: gemessener Volumenstrom mit E-Wapu Betrieb im Fahrzeug

Der Auslegungspunkt der Pumpe liegt bei 5500l/h und 0,6 bar. Auf dem Prüfstand der Baustufe 1 ergab dies eine ungefähre elektrische Leistungsaufnahme von 200 Watt. Im Fahrzeug erreichen wir diese Werte nicht. Wir führen diese Differenz auf den höheren Druckverlust im Kühlmittelkreislauf, der zusätzlichen Verschlauchung und einen anderen E-Motortyp zurück.

Die nächste Abbildung zeigt den Verlauf des Volumenstromes im gekuppelten Zustand, d.h. der Verbrennungsmotor treibt über den Riementrieb und Generator das Pumpenrad an. Die Übersetzung beträgt dabei 2,8.

Kavitation ist ab ca. 14.000 UPM messbar. Die Differenz zur Rechnung und Baustufe 1 ist mit dem hier höheren Systemdruck zu erklären. Dies wirkt sich wiederum positiv auf unser Konzept aus (Drehzahlspreizung). Der bei diesen hohen Drehzahlen erzeugte Volumenstrom ist für dieses Fahrzeug bei mittleren Drehzahlen ausreichend und bei sehr hohen Drehzahlen überdimensioniert.

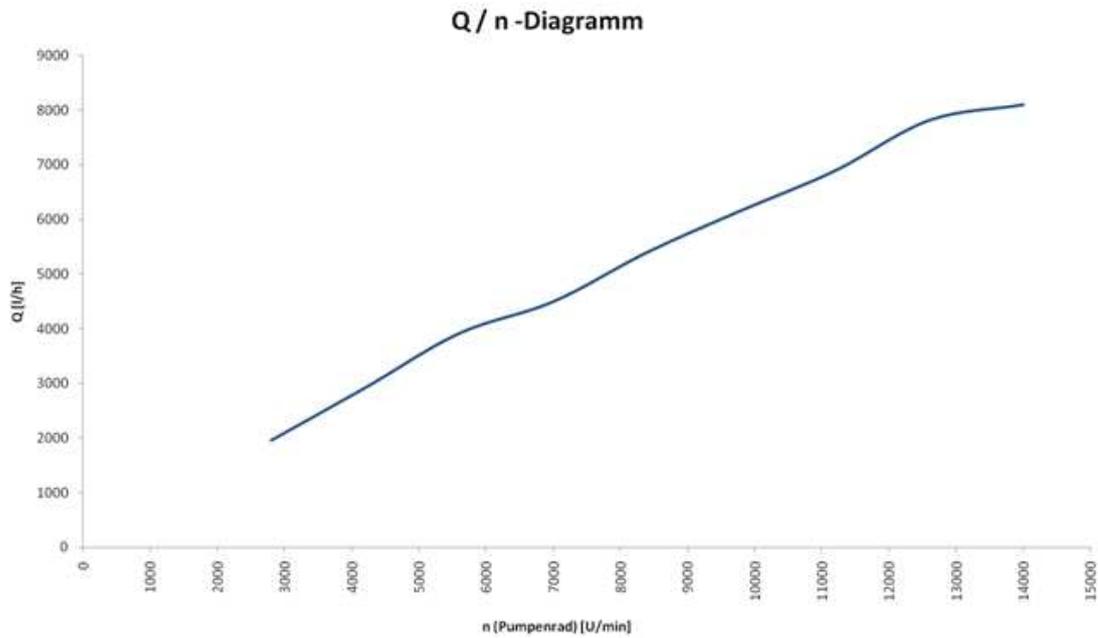


Abbildung 38: Verlauf Volumenstrom bei höheren Drehzahlen im Fahrzeug

Abschließend ist zu betonen, dass diese Messwerte einen „ersten Schuss“ darstellen, dem noch Optimierungsmaßnahmen folgen sollten. Das Potential dazu ist jedenfalls vorhanden.

3.3 Erreichung des Projektzieles und Fazit

Das Projektziel wurde erreicht. Die drei Baustufen wurden erfolgreich abgeschlossen. Es wurde ein funktionsfähiger Prototyp in einem Fahrzeug eingebaut.

Während des Projektes, wurde im Rahmen der Fahrzeugbeschaffung das Konzept indirekt einem OEM vorgestellt. Konsequenz daraus war, dass wir nicht mehr direkt einen OEM ansprechen werden, weil wir nicht Serienhersteller werden wollen. Vielmehr konzentrieren wir uns auf größere Systemlieferanten, um denen diese Technologie anzubieten. Wir orientieren uns auch international.

Eine direkte Messung über eine Verringerung des Kraftstoffverbrauches ist nicht möglich, da das Fahrzeug bereits über eine serienmäßige E-Wapu verfügt und die technische Basis durch den Umbau verändert wurde. Der Riementrieb ist geometrisch anders, der Klimakompressor fehlt und es gibt eine zusätzliche Umlenkrolle. Damit ist eine Messung mit dem Serienstand nicht vergleichbar. Gegenüber den herkömmlichen mechanisch angetriebenen Wasserpumpen wird es eine Kraftstoffeinsparung geben, gerade wegen der unterschiedlichen Leistungsaufnahmen und Betriebsstrategien.

Wir nehmen hier die Argumentation bei der Einführung der serienmäßigen E-Wapu auf.¹⁴ Verbrauchspotentiale erschließen sich beim Warmlauf und bei der Steuerung der Motortemperatur in den verschiedenen Betriebsarten des Verbrennungsmotors.

Eine Herausforderung war die Drehzahlspreizung und die damit eventuell auftretende Kavitation. Im Fahrzeug ist der Einfluss der Kavitation ab 14.000 UPM messbar. Das hat aber keine negativen Folgen für die Höhe des Volumenstromes.

¹⁴ MTZ 11/2005 Das Wärmemanagement des neuen BMW Reihensechszylindermotors, Abschnitt 4, 5 und 6

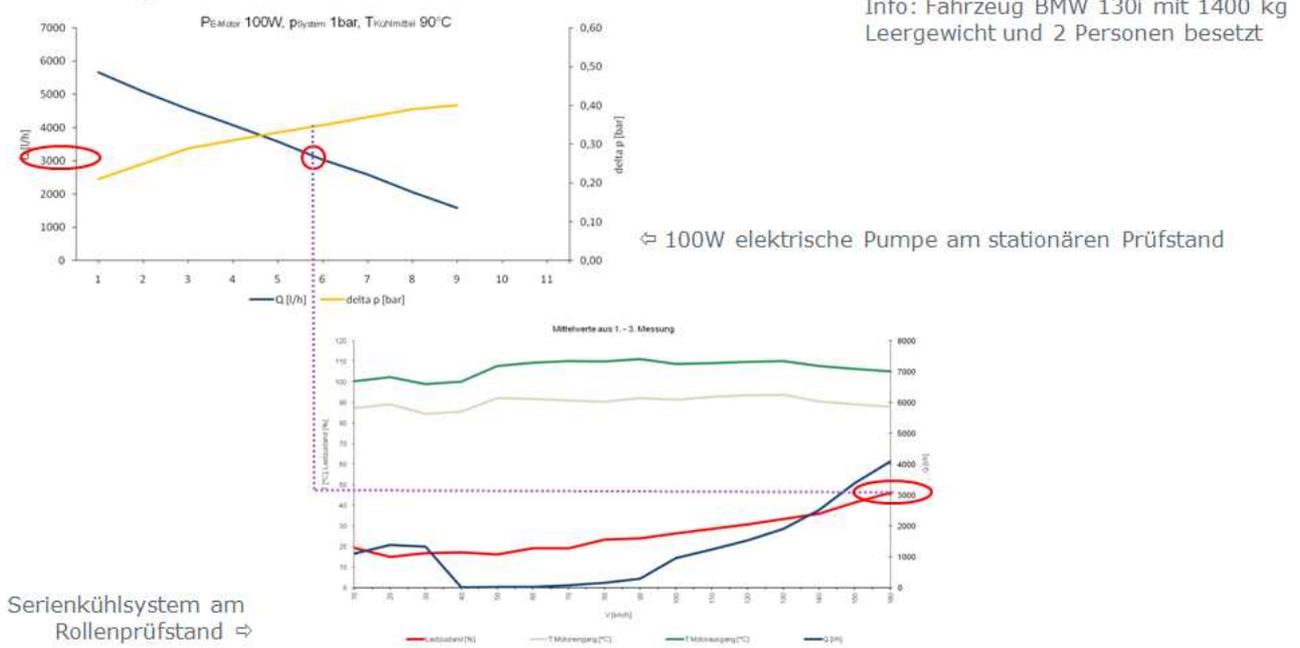


Abbildung 39: Vergleich Volumenstrom stationär und serienmäßiger Zustand

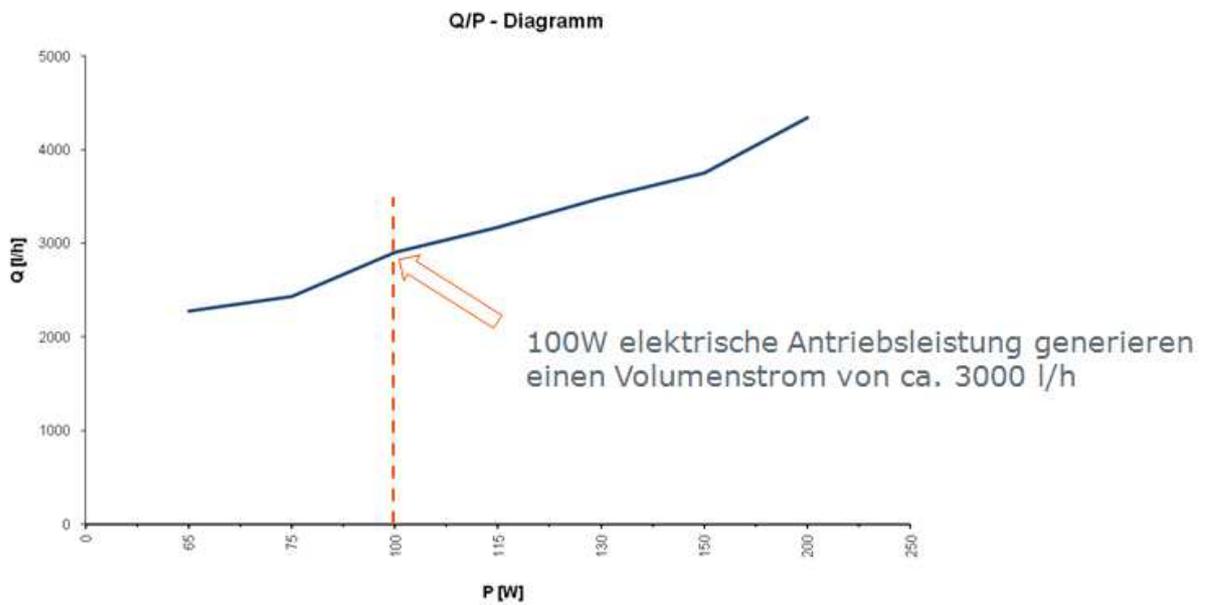


Abbildung 40: Volumenstrom im E-Wapu Betrieb im Fahrzeug bezogen auf die elektrische Antriebsleistung

Um unser Konzept beispielhaft zu bestätigen, haben wir die Leistungsaufnahme im E-Wapu Betrieb auf 100 Watt begrenzt. Das ergibt stationär auf dem Prüfstand einen Volumenstrom von 3.000 l/h. Im Fahrzeug erreichen wir diesen Wert wegen des höheren Druckverlustes nicht ganz.

Die Durchflussmessung für das serienmäßige Kühlsystem auf dem Rollenprüfstand ergab bei 3000 l/h eine Geschwindigkeit von ca. 145 km/h (erhofft waren 160 bis 170 km/h). Damit liegt die Geschwindigkeit etwas niedriger als erwartet. Beim Vergleich der gemessenen und berechneten Kurven aus Abbildung 37 (rote Kurven entsprechen der 100 Watt Leistungsaufnahme) fällt auf, dass bei einem Volumenstrom von 3.000 l/h eine Differenz vorhanden ist, die auf geometrische Abweichungen beim Pumpenrad zurückgeführt wird.

Basierend auf dem jetzigen Stand des Prototypen gibt es noch Potentiale zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Pumpe im E-Wapu Betrieb.

Die Geometrie des Pumpenrades wurde bis zum jetzigen Stand beibehalten (Durchmesser und Anzahl der Schaufeln). Ein anderes Fertigungsverfahren, welches das CAD-Modell genauer abbildet, bringt eine Verbesserung. Bedingt durch das jetzige Herstellverfahren müssen wir eine Schaufeldicke von 2mm vorhalten. Dünner kann nicht gegossen werden. Eine Verringerung der Schaufeldicke führt zur Vergrößerung des Wasserraumes des Pumpenrades und damit zu einer Leistungssteigerung.

Eine Optimierung der Anströmung des Pumpenrades kann durch Detailarbeit im Bereich der Gleitringdichtung gelöst werden.

Beim Außengehäuse ist es denkbar, den Innenflächen (Wassermantel) eine spiralförmige Kontur zu geben, die das Kühlmittel in einen Drall versetzen.

Eine optimale Auslegung des E-Motors für die Leistungsaufnahme in Abstimmung mit der Auslegung des Pumpenrades bringt weiteres Potential.

Erwähnt werden muss auch, dass die jetzige Verschlauchung im Fahrzeug zu einem erhöhten Druckverlust im Kühlsystem führt.

Wir sind überzeugt, dass die aufgezeigten Verbesserungspotentiale zu einer spürbaren Leistungssteigerung führen.

4. Projektstand per 30. November 2010

4.1 Patentstand

Die Erfindung wurde am 17. Juli 2006 zum Patent beim Deutschen Patent- und Markenamt als internationale Patentanmeldung mit der Nummer EP 1 881 586 B1 eingereicht. Das Patent wurde am 20.01.2010 erteilt.

Die Einspruchsfrist ist am 20.10.2010 ohne Einspruch abgelaufen.

4.2 Mögliches Serienkonzept

Eine konstruktive Ausgestaltung erfolgte nach folgenden Überlegungen:

Die Befestigung am Motor erfolgt im Bereich der Riemenscheibe, die dort entstehenden größten Kräfte werden von einem inneren Gehäuse aufgenommen, welches die tragende Struktur der Baugruppe ist.

Dieses innere Gehäuse wird am Motor verschraubt. Ausführung in Aluminium, damit eine gute Wärmeabfuhr gewährleistet ist.

Die Reduzierung von mechanischen Bearbeitungen am inneren Gehäuse ist vorgesehen, um die Herstellkosten niedrig zu halten. Ebenso die strömungsgünstige Gestaltung der Außenflächen des inneren Gehäuse.

Ergänzend noch die Optimierung und Reduzierung der Anzahl von Abdichtungen zum Wasserraum.

Für den Einbauort gibt es drei unterschiedliche Ansätze:

1. Einbau auf der heißen Seite des Motors (Abgasseite):
Bedingt durch die höheren Umgebungstemperaturen wird das Außengehäuse und die Schnecke aus Alu hergestellt.
2. Einbau auf der kalten Seite des Motors (Einlassseite):
Außengehäuse und Pumpenschnecke sind in Kunststoff (z.B. PA6 oder PA6.6) darstellbar.
3. Integration in den Verbrennungsmotor:
Das Außengehäuse ist am Motor mit angegossen, Ölwanne, Bedplate oder das Kurbelgehäuse sind mögliche Integrationspunkte.
Diese Bauteile führen Öl => Integration eines Öl/Wasser-Wärmetauschers darstellbar. Zusätzliches Benefits je nach Motorkonzept.

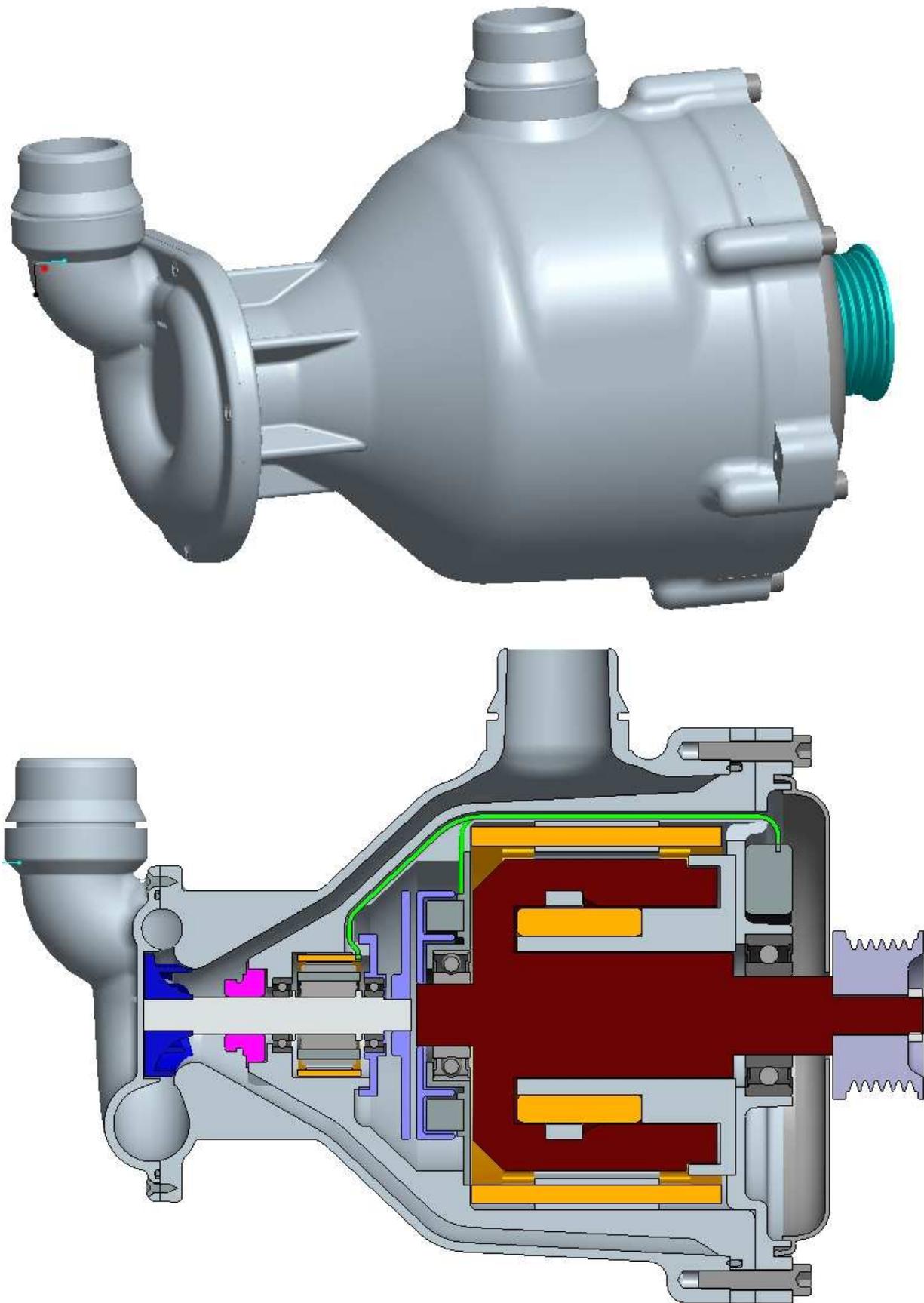


Abbildung 41: Konzept einer möglichen Serienlösung

Literaturverzeichnis

Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Jahrgang 65, 11/2004:

Fa. Pierburg GmbH

Dipl.-Ing. Albert Genster , Dipl.-Ing. Waldemar Stephan

Immer richtig temperiert, Thermomanagement mit elektrischer Kühlmittelpumpe

Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Jahrgang 66, 3/2005:

Fa. Elring Klinger Motortechnik GmbH

Dr.-Ing. Gerald Eifler, Marco Burkard, Frank Kawert

Bedarfsabhängig geregelte Motorkühlung- Versuch in Simulation

Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Jahrgang 66, 11/2005:

Fa. BMW AG

Dipl.-Phys. Ulrich Hess, Dr.-Ing. Alexander Mitterer, Dr.-Ing. Stephan

Neugebauer, Dipl.-Ing. (FH) Peter Riegert, Dr.-Ing. Gerald Seider

Das Wärmemanagement des neuen BMW Reihensechszylindermotors

Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Jahrgang 66, 11/2005:

Fa. Behr GmbH& Co. KG

Dipl.-Ing. Bruno Knauf, Dr.-Ing. Eberhard Pantow

Auslegung eines Kühlsystemsmit elektrischer Kühlmittelpumpe

Robert Bosch GmbH:

Gelbe Reihe, Fachwissen Kfz-Technik, Elektrik und Elektronik für Kraftfahrzeuge, Generatoren und Starter, 1. Ausgabe, Oktober 2002

Kolbenschmidt Pierburg Group:

Elektrische Kühlmittelpumpen, immer richtig temperiert

elektronisch veröffentlicht unter der URL [http://www.kspg-](http://www.kspg-ag.de/pdfdoc/kspg_produktdroschueren/2007/pb04_elek_kuehlmittelp.pdf)

[ag.de/pdfdoc/kspg_produktdroschueren/2007/pb04_elek_kuehlmittelp.pdf](http://www.kspg-ag.de/pdfdoc/kspg_produktdroschueren/2007/pb04_elek_kuehlmittelp.pdf)