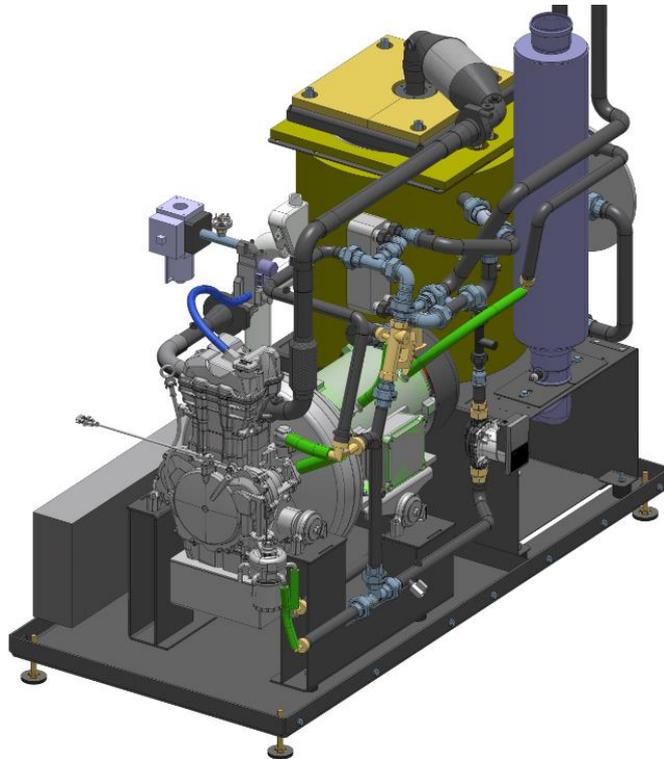




Schlussbericht vom 18. Dezember 2019

Aladin II

Aufbau und Betrieb von fünf Prototypenanlagen eines gasbetriebenen, hochflexiblen, „near-zero Emission“ Klein- BHKW



Aladin II – Visualisierung der Prototypenanlage



Aladin II

Aufbau und Betrieb von fünf Prototypenanlagen eines gasbetriebenen, hochflexiblen, „near-zero Emission“ Klein-BHKW



Datum: 18. Dezember 2019

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Bucher AG Langenthal Motorex Schmiertechnik
Bern-Zürichstrasse 31
CH-4900 Langenthal

Hoval Aktiengesellschaft
Austrasse 70
9490 Vaduz

sa-charging solutions AG
Obere Bahnhofstrasse 11
5507 Mellingen

ETH Zürich
Institut für Energietechnik (LAV) & Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC)
Sonneggstrasse 3
8092 Zürich

Autoren:

Christian Schürch, ETHZ, LAV,	schuercc@lav.mavt.ethz.ch
Tammo Zobel, ETHZ, IDSC,	tzobel@idsc.mavt.ethz.ch
Agim Asani, sa-charging solutions AG	a.asani@sa-charging.com
Martin Moisi, Hoval Aktiengesellschaft	martin.moisi@hoval.com
Markus Staubli, Motorex AG	markus.staubli@motorex.com

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung: Stephan Renz, renz.btr@swissonline.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501300-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Als Weiterentwicklung eines Laborprüfstandes (siehe [1]) wurden fünf Versuchsmuster einer kompakten mBHKW Anlage gebaut und an drei verschiedenen Standorten betrieben. Die Konstruktion sowie der Anlagen- und Schaltschrankbau hat unter der Federführung der Firma Hoval Aktiengesellschaft in Vaduz stattgefunden. Der für diese Leistungsklasse von < 10kW hervorragende elektrische Wirkungsgrad von 32% sowie die extrem tiefen Stationär- ($\text{NO}_x < 13 \text{ mg/Nm}^3$, $\text{CO} < 31 \text{ mg/Nm}^3$, $\text{HC} < 3 \text{ mg/Nm}^3$) und Kaltstartemissionen erfüllen die Zielsetzungen des Projektes und übertreffen damit insgesamt sämtliche derzeit am Markt erhältlichen Produkte. Der thermische Wirkungsgrad von derzeit 56% muss in einer überarbeiteten Version auf mindestens 76% angehoben werden, damit eine technische Konkurrenzfähigkeit diesbezüglich gegeben ist. Dank des gesamthaft rund 2800h dauernden Betriebs vierer Anlagen zwecks Forschungstätigkeiten, Untersuchung der Dauerfestigkeit, der Schallemissionen und des Temperaturhaushaltes, konnten technische Probleme an Nockenwelle, Ventiltrieb und Abgastrakt identifiziert und behoben werden. So konnte eine der Einzelanlagen zuletzt >1000h ohne Mängel betrieben werden. Weitere Defizite der Anlage wie Lärmemissionen und zu hohe Innenraumtemperaturen wurden dokumentiert und müssen in der folgenden Phase des Übergangs vom Versuchsmuster zum Prototypen umgesetzt werden. Das nachfolgend dokumentierte Projekt wurde parallel zu einem Forschungs- und Entwicklungsprojekt (F&E, SI/501278-01) durchgeführt, das detailliert Möglichkeiten der Emissionsreduktion, sowie steuerungs- und regelungstechnischen Fragestellungen untersucht. Für tiefergehende Darstellungen sei auf den zugehörigen Schlussbericht verwiesen [2].

Résumé

Dans le cadre de la mise au point d'un banc d'essai de laboratoire [1], cinq installations d'essai d'une micro-centrale de production combinée compacte de chaleur et d'électricité (PCEC) ont été construites et exploitées dans trois différents sites. La conception / construction des installations ainsi que la fabrication des armoires de commande ont été effectuées sous la direction de Hoval Aktiengesellschaft à Vaduz. L'excellent rendement électrique de 32%, ainsi que les valeurs extrêmement basses en régime permanent ($\text{NO}_x < 13 \text{ mg/Nm}^3$, $\text{CO} < 31 \text{ mg/Nm}^3$, $\text{HC} < 3 \text{ mg / Nm}^3$) et les émissions en démarrage à froid ne répondent pas seulement aux objectifs initiaux du projet, mais surpassent toutes les centrales PCEC disponibles dans le commerce de la classe de puissance <10 kW_{el}. Pour être techniquement compétitif, le rendement thermique actuel de 56% doit être porté à au moins 76% dans une version révisée. Grâce aux quelque 2800 heures de fonctionnement de quatre unités à des fins de recherche, de test de durabilité, de test d'émission de bruit et de gestion de la température, des problèmes techniques liés à l'arbre à cames, au train de soupapes et au circuit d'échappement ont été identifiés et résolus. En conséquence, l'une des centrales a été exploitée pendant plus de 1 000 heures sans défaillance, défaut ou erreur. D'autres défauts du système, tels que les émissions sonores et les températures intérieures excessivement élevées, ont été documentés et doivent être résolus lors de la phase suivante à savoir la transition d'un banc d'essai à un prototype. Le projet documenté ci-dessous a été mené parallèlement à un projet de recherche et développement (SI/501278-01) qui a examiné en détail les possibilités de réduction des émissions ainsi que des problèmes de contrôle spécifiques. Pour plus d'informations, veuillez vous reporter au rapport final correspondant [2].

Abstract

As a further development of a laboratory test bench [1], five test plants of a compact micro combined heat and power plant (mCHP) were built and operated at three different locations. The plants'



design/construction as well as the switching cabinet production took place under the guidance of Hoval Aktiengesellschaft in Vaduz. The excellent electrical efficiency of 32% as well as the extremely low steady-state ($\text{NO}_x < 13 \text{ mg / Nm}^3$, $\text{CO} < 31 \text{ mg / Nm}^3$, $\text{HC} < 3 \text{ mg / Nm}^3$) and coldstart emissions not only meet the initial project goals but also surpass all commercially available mCHP plants of the power class $< 10 \text{ kW}_{\text{el}}$. The thermal efficiency of currently 56% has to be raised to at least 76% in a revised version in order to be technically competitive. Thanks to the total of around 2800 hours of operation of four units for the purpose of research, durability testing, noise emission testing and temperature management, technical problems with the camshaft, valve train and exhaust path have been identified and resolved. As a results, one of the individual plants was operated $> 1000 \text{ h}$ without any failures, faults or errors. Further system shortcomings such as the noise emissions and the excessively high interior temperatures were documented and must be addressed in the subsequent phase of transitioning from a testbench to a prototype. The project documented below was carried out in parallel to a research and development project (SI/501278-01) that examined in detail the possibilities of emission reduction as well as specific control issues. For more detailed information, please refer to the corresponding final report [2].

Take-home messages

- Der für die Leistungsklasse sehr hohe elektrische Wirkungsgrad, die kurze Anlaufzeit und die sehr tiefen Emissionen zeigen ein beachtliches technisches Potential der Anlage.
- Für eine erfolgreiche Markteinführung ist eine Überarbeitung des Systems (Packaging, Schalldämmung, Wärmehaushalt, Steuerung) aus technischen wie praktischen Gründen zwingend nötig.
- Eine überarbeitete, marktreife Anlage wird sich – v.a. als Teil eines grösseren BHKW-Schwarmes – ideal für Power-On-Demand-Aufgaben eignen, um fluktuierende erneuerbare Energiequellen zu ergänzen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Abstract	3
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Ausgangslage	7
Ziele des Projektes	7
Grundlagen – Randbedingungen	8
Konzept – Anlagenbeschrieb	8
Vorgehen / Methode	10
Ergebnisse	11
Bau, Inbetriebnahme und Betrieb von PT1	11
Bau der Versuchsmuster PT2 – 5	12
Inbetriebnahme und Betrieb der Anlagen PT2 – 5 an den dezentralen Standorten	16
Überarbeitung der Anlage bezüglich Dauerfestigkeit.....	19
Überarbeitung und Weiterentwicklung der BHKW-Steuerung	29
Untersuchung des Wärmehaushaltes der Gesamtanlage	33
Untersuchung der Schallemissionen der Gesamtanlage	38
Ausblick	41
Zukünftige Weiterentwicklung des Anlagenaufbaus und die Weiterverwendung der fünf Anlagen.....	41
Zukünftige Weiterentwicklung der BHKW Steuerung und Regelung	41
Optimierung des Wärmehaushalts und der Schallemissionen	42
Diskussion	46
Schlussfolgerungen	50
Motorex Bucher AG	50
Hoval Aktiengesellschaft	50
Referenzen	52



Abkürzungsverzeichnis

CO *Kohlenstoffmonoxid*

ETH *Eidgenössische Technische Hochschule*

F&E *Forschung und Entwicklung*

FEM *Finite Elemente Methode*

HC *Kohlenwasserstoffe*

IDSC *Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik*

LAV *Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme*

NOx *Stickoxide*

PT *Pilotanlage*

WKK *Wärme-Kraft Kopplung*



Ausgangslage

Zur Erfüllung der Energiestrategie 2050 des Bundes, mit sehr hohen Anteilen stochastisch anfallender (fluktuierender) Stromerzeugung aus Wind- und insbesondere aus Sonnenenergie, wird die Verfügbarkeit von „power-on-demand“ unentbehrlich. Dezentrale, Netz-geführte WKK-Anlagen – falls gleichzeitig Wärmebedarf da ist – können, mit kurzen Reaktionszeiten für das Auf- und Abschalten von deutlich weniger als einer Minute, eine optimale Lösung darstellen. Hierfür müssen solche Anlagen tiefe Emissionswerte – insbesondere während eines Kaltstarts – aufweisen und als kompakte Maschinen für den breiten Einsatz in unterschiedlich gearteten Immobilien einsetzbar sein. Eine hohe Effizienz sowie die Möglichkeit erneuerbaren Treibstoff zu verwenden stellen weitere Anforderungen an eine solche Maschine dar.

Im Vorgängerprojekt „Aladin I“ [1] wurden bis 2014 Grundlagen hinsichtlich der Arbeitsprozessoptimierung, Zündverfahren und zyklischer Variation der Verbrennung von Motoren für WKK-Anlagen im Gasbetrieb erarbeitet. Hierfür wurde unter anderem in einer Laborumgebung ein Motor mit rund 8 kW mechanischer Leistung auf einer Wirbelstrombremse montiert und verschiedene Komponenten zur Wärmerückgewinnung in einer losen Anordnung zu Testzwecken aufgebaut und an den Motor angeschlossen. So konnten grundsätzliche Elemente einer WKK Anlage charakterisiert und ausgewählt werden sowie Optimierungen am Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors und an der Abgasnachbehandlung durchgeführt werden. Der Aufbau entsprach jedoch wegen der Ausrichtung auf Grundlagenuntersuchungen in keiner Weise den Anforderungen einer Kompletanlage, wie sie in einem Haus zur dezentralen Strom- und zentralen Wärmeerzeugung installiert würde. Hierzu fehlte eine kompakte Konstruktion, die Motor, Generator sowie alle Komponenten zur Wärmerückgewinnung und Abgasnachbehandlung innerhalb eines schallgedämmten Gehäuses vereint. Zudem gab es keinen Schaltschrank, der die Verbrennungsmotorsteuerung, Leistungselektronik, Netzanbindung, Sensorik und die Ansteuerung der übrigen elektrischen Aktoren zentral und platzsparend unterbringen konnte. Die Auswahl der Einzelkomponenten für eine Kompletanlage war einerseits noch nicht abgeschlossen und andererseits auch noch nicht optimal bezüglich thermischer Effizienz und Kosten.

Ziele des Projektes

Ziel dieses Projektes ist es, 5 Exemplare einer WKK-Anlage zu bauen, welche den oben genannten Ansprüchen gerecht werden und deren Technologie in einem parallel laufenden F&E Projekt [2] entwickelt wird. Diese Anlagen sollen im vorliegenden Projekt bezüglich Anlagenbau soweit entwickelt und verbessert werden, dass der Schritt zur Serienproduktion möglichst klein wird. Sie sollen rund 8 kW elektrische bei rund 12 kW thermischer Leistung liefern und sich somit zur Marktdurchdringung im Gebäudebereich Ein-/Mehrfamilienhäuser, Schulen, Gewerbe eignen; insbesondere dann, wenn interessante Geschäftsmodelle wie „Contracting“ durch spezialisierte Energieversorgungsunternehmen aufgegriffen werden.

Das geplante System soll sich von den bisher am Markt verfügbaren Anwendungen durch die tiefen Emissionen – welche unter den für die Städte Zürich und Basel geltenden Grenzwerten (NO_x : 50 mg/Nm³, CO: 650 mg/Nm³, jeweils bei 5% O₂ Gehalt im Abgas) für Heizanlagen liegen sollen –, den für diese Leistungsklasse hohen elektrischen Wirkungsgrad von über 32 % und sein stromgeführtes Betriebskonzept unterscheiden.

Mit dem Betrieb der 5 Anlagen soll gezeigt werden, dass die angestrebten technischen Spezifikationen tatsächlich erreicht werden. Zudem sollen mit den geplanten Versuchen Schwachstellen und Verbes-



serungspotentiale identifiziert werden, welche in einem weiterführenden Schritt zur Markteinführung berücksichtigt werden sollen. Die Unterschiede bezüglich des Anwendungszwecks sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Grundlagen – Randbedingungen

Mit einem Mikro Blockheizkraftwerk (mBHKW), welches kurze Aufwärm- und Startzeiten aufweist, soll z.B. im Schwarmbetrieb dezentral elektrische Energie zur Netzstabilisierung bereitgestellt werden. Ein für diese Leistungsklasse sehr hoher elektrischer Wirkungsgrad von 32% sorgt für eine hohe Stromausbeute. Damit durch die konzeptbedingten häufigen Kaltstarts nicht untragbare Emissionsbelastungen hervorgerufen werden soll die Anlage besonders schadstoffarm und insbesondere für den Kaltstart optimiert sein.

Konzept – Anlagenbeschreibung

Die mBHKW Anlage Aladin II setzt sich aus einer Motor-Generatoreinheit, welche das Herzstück bildet, sowie peripher angeordneten Komponenten zur Wärmerückgewinnung, Abgasmachbehandlung, Sensorik, Aktorik zur Anlagensteuerung und einem Schaltschrank zusammen. Abb. 1 zeigt schematisch den Aufbau der Anlage.

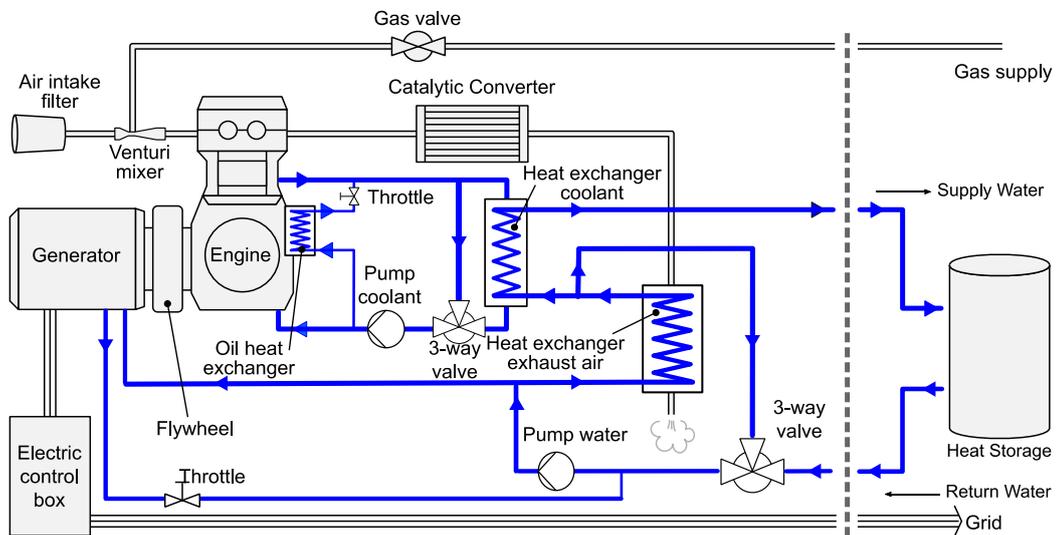


Abb. 1: Schema des Aladin II mBHKW (PT1)

Der 325 ccm 4-Takt Einzylindermotor stammt aus dem Freizeitmotorsportbereich und wurde von Swiss-auto Powersport LLC entwickelt. In der ursprünglichen Anwendung wird der Motor mit Benzin und bei wechselnder Last und Drehzahl betrieben. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde der Motor für den Vollastbetrieb bei 3000 1/min optimiert.



Der wassergekühlte Generator wurde von der Elektro Motoren Werk Brienz AG entwickelt und hergestellt. Es handelt sich hierbei um eine 50 Hz asynchron Maschine, welche 7.5 kW elektrische Leistung bei einem Wirkungsgrad von 93.1% liefert. Der Cos Phi liegt bei diesem Betriebspunkt bei 0.93. Mit einem Gewicht von 85 kg stellt es neben dem Wärmetauscher eine der schwersten Komponenten der Anlage dar. Ein integrierter PTC Temperaturfühler liefert die Windungstemperatur, welche von der Anlagensteuerung zwecks Sicherstellung eines sicheren Betriebs ausgewertet wird. Während dem Startvorgang dient die Maschine als Motor und bringt den Verbrennungsmotor auf Nenndrehzahl, bevor dieser mit Kraftstoff versorgt wird und schlussendlich die Elektromaschine antreibt.

Der Abgaswärmetauscher ist eine innovative Entwicklung der Hoval Aktiengesellschaft auf Basis der eigens entwickelten aluFer[®] Technologie und wird in Hoval Gasheizkesseln bereits seit einigen Jahren serienmässig eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein senkrecht stehendes, von unten nach oben wasserumspültes Rohrbündel, durch welches das heisse Abgas von oben nach unten strömt. Die Rohre selber stellen die eigentliche Innovation dar und weisen eine von der Hoval Aktiengesellschaft entwickelte Geometrie und Konstruktion auf, welche eine ideale Abkühlung der Rauchgase sowie das Auskondensieren des darin enthaltenen Wasserdampfes erlaubt. Durch die Kondensation eines möglichst grossen Teils des Wasserdampfes kann die latente Wärme und somit ein Teil des oberen Heizwertes des Brennstoffs genutzt werden.

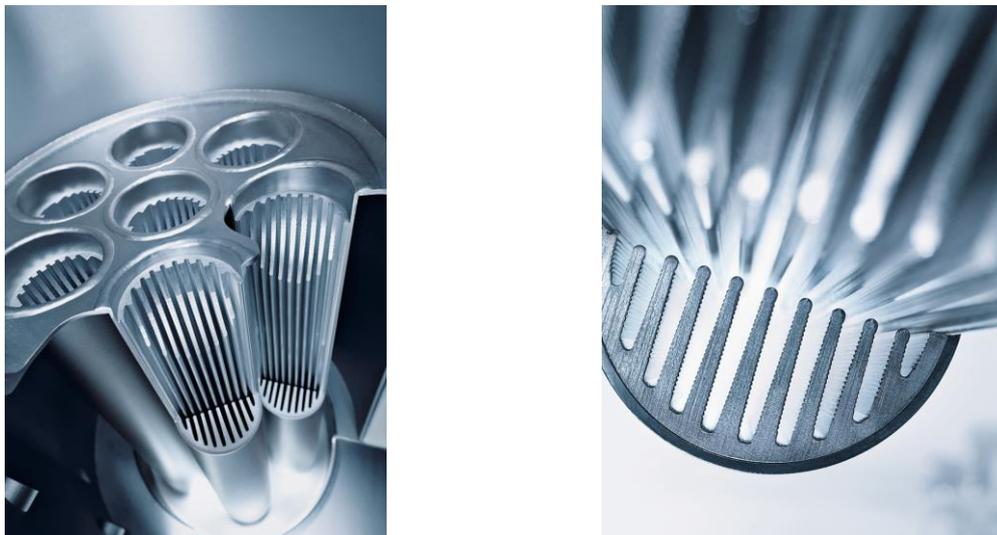


Abb. 2: Aufbau und Anordnung des Rohrbündels eines aluFer[®] Wärmetauschers

(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

Das im Motor verbrannte Erdgas-Luft Gemisch erzeugt mechanische Leistung, welche im Generator in elektrische umgewandelt wird. Der produzierte Strom wird ins lokale Netz eingespeist, während die Abwärme des Motors und des Abgases im umgebenden Haus direkt verwendet wird. Vom Rücklauf der Gebäudeheizung oder eines Pufferspeichers gelangt das Heizungswasser mit der tiefst möglichen Temperatur zuerst in den Generator und den Abgaswärmetauscher. So kann eine tiefe Generatortemperatur und ein Kondensieren des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes ermöglicht werden. Die Motorabwärme wird anschliessend mit einem Plattenwärmetauscher vom Kühlwasser an das Heizungswasser



übertragen, bevor das Heizungswasser die Anlage im Vorlauf wieder verlässt. Die stufenlose Regelung von Pumpen und 3-Wegeventilen ermöglicht eine akkurate Temperaturregelung von Motor, Öl und Vorlauf sowie ein optimiertes Aufwärmverhalten der Anlage. Mit dem 3-Wegekatalysator und einer Lambdaregelung werden die Abgasemissionen minimiert, sodass jegliche Grenzwerte für stationär betriebene Gasmotoren eingehalten werden.

Vorgehen / Methode

Um das Ziel der Demonstration einer möglichst seriennahen Anlage zu erreichen, wurden vier Zweckgruppen der zu betreibenden Anlagen gebildet. Tabelle 1 zeigt die vorgesehenen vier Gruppen mit den involvierten Anlagen PT1 – 5.

PT1	Betrieb in Zürich durch die beiden ETH Institutionen IDSC und LAV zur Optimierung der Betriebsstrategie und der Schadstoffemissionen während Kaltstarts
PT2	Betrieb in Langenthal von Motorex als Pilot- und Demonstrationsanlage um die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu untersuchen.
PT3 & 4	Betrieb in Mellingen durch sa charging solutions AG als Dauerläufer um die Dauerfestigkeit zu untersuchen.
PT5	Betrieb in Vaduz durch die Hoval Aktiengesellschaft zwecks Schallemissionsuntersuchungen und thermischer Optimierung.

Tabelle 1: Die vier Zweckgruppen und Einteilung der fünf Prototypen PT1 – PT5.

PT1 wurde im Gegensatz zu den übrigen Anlagen als Prüfstandsanlage mit guter Zugänglichkeit zu allen Komponenten und somit ohne Gehäuse und ohne Fokus auf ein kompaktes Design konzipiert. Sie ging als erste Anlage in Betrieb mit dem Ziel bereits erste Erkenntnisse in die Planung der übrigen Anlagen einfließen lassen zu können, siehe auch Kapitel «Ergebnisse». Mit PT1 sollten in erster Linie Forschungsfragen für das parallellaufende F&E Projekt [2] beantwortet werden und die Grundlagen zur Motor- und Anlagensteuerung erarbeitet werden, welche auf die anderen Anlagen übertragen wurden.

PT2 war als reine Demonstrationsanlage vorgesehen und hätte Erkenntnisse zur Wirtschaftlichkeit bringen sollen. Wegen diverser technischer Schwierigkeiten im Projektverlauf konnte diese Anlage nicht am vorgesehenen Ort in Betrieb gehen.

Die Dauerlaufanlagen PT3 & 4 wurden zwecks Untersuchung der Dauerfestigkeit der Gesamtanlage sowie von Einzelkomponenten betrieben. Es konnten wichtige Erkenntnisse für ein künftiges Redesign der Anlage gewonnen werden.

PT5 wurde spezifisch für die Untersuchung des Wärmehaushaltes sowie zur Optimierung der Schallemissionen betrieben. Auch hier konnten essentielle Erkenntnisse für eine künftige Überarbeitung des Systems erarbeitet werden.

Die in vordefinierten Intervallen gezogenen Ölproben aus allen Anlagen wurden von Motorex untersucht, um die im Rahmen des parallellaufenden F&E Projektes geplante Ölentwicklung voranzutreiben.

Ergebnisse

Bau, Inbetriebnahme und Betrieb von PT1

(LAV, ETHZ)

Die Konstruktion der ersten Anlage (PT1) unterscheidet sich leicht von den übrigen vier, da diese auch als Versuchsträger für das parallel laufende F&E Projekt SI/501278-01 [2] dient und eine gute Zugänglichkeit aller Komponenten erfüllen muss. Abb. 3 zeigt die Konstruktion von PT1.

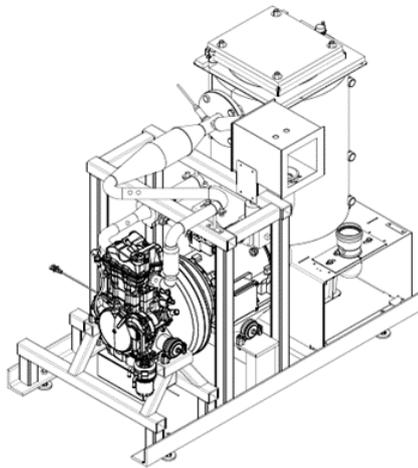


Abb. 3: Laboranlage PT1 der ETHZ
(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)



Abb. 4: Die Laboranlage PT1, wie sie an der ETH von IDSC und LAV betrieben wird.

Der Rahmen für PT1 wurde bei Hoval gefertigt während die Anlage an der ETH komplettiert wurde. Abb. 4 zeigt PT1 im gemeinsam vom LAV und dem IDSC betriebenen Prüfstand an der ETH. Der Inbetriebnahmeprozess von PT1 war besonders wichtig, da die ersten Erkenntnisse daraus in die Verbesserung der Anlagen PT2-5 fließen sollten. Die Inbetriebnahme wurde in folgende Phasen unterteilt:

- Inbetriebnahme Schaltschrank mit Motorsteuerung, Sensoren und Aktoren
- Inbetriebnahme Genset
- Inbetriebnahme Gesamtanlage

Während der Schaltschrankinbetriebnahme konnten noch einige Verbesserungen und Korrekturen am Elektroschema gemacht werden, welche den Inbetriebnahmeprozess für die vier folgenden Anlagen positiv beeinflusst hat. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Gensets wurde die Anlage genutzt, um eine robuste Regelung für den Wasser- und Kühlmittelkreislauf zu entwickeln.

An der PT1 Anlage wurde mittels Leistungsmessungen eine Energiebilanz im stationären Zustand des Gesamtsystems erstellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Werte der thermischen Leistung sind stark von der Isolation, v.a. jener des Abgastraktes abhängig. Letztere hat sich im Verlaufe des Betriebes zersetzt. Der Isolationswert hat sich entsprechend über die Zeit verschlechtert und auf



einem tiefen Niveau stabilisiert. Die in Tabelle 2 angegebenen Werte bezieht sich auf die Isolation nach Stabilisierung des Zersetzungsprozesses. In Klammern sind die Werte bei neuwertiger Isolation angegeben, welche das Potential der Anlage widerspiegeln. Diese Problematik wurde gegen Ende des Projektes an PT3 und 4 untersucht und eine überarbeitete Isolation auf deren Dauerfestigkeit getestet (siehe Kapitel Isolation Abstrakt). Die gewonnenen Erkenntnisse konnten an der PT1 Anlage für abschliessende Energiebilanzmessungen nicht mehr umgesetzt werden.

Brennstoffmassenstrom	[g/s]	0.43
Brennstoffleistung (Referenz: unterer Heizwert)	[kW]	23.4
Mechanische Leistung	[kW]	8.2
Elektrische Leistung	[kW]	7.5
Thermische Leistung bei 30°C Rücklauftemperatur inkl. Kondensation	[kW]	13.1 (17.3)
Mechanischer Wirkungsgrad	[%]	35
Generatorwirkungsgrad	[%]	91
Elektrischer Wirkungsgrad	[%]	32
Thermischer Wirkungsgrad bei 30°C Rücklauftemperatur inkl. Kondensation	[%]	56 (74)
Anlagenwirkungsgrad bei 30°C Rücklauftemperatur inkl. Kondensation	[%]	88 (106)

Tabelle 2: Resultate der Energiebilanz von PT1 im stationären Zustand. Die Werte in Klammern geben den potentiell möglichen Maximalwert bei überarbeiteter Isolation an. Diese Werte wurden bei PT1 mit neuwertiger Isolation erreicht.

Bau der Versuchsmuster PT2 – 5

(Hoval Aktiengesellschaft)

Neben Entwurf, Konstruktion und Fertigung der mechanischen, thermischen und hydraulischen Grundbausteine sowie der Auswahl an Komponenten der Gasstrecke und Gas-Luftmischung sind die WKK Versuchsanlagen als Gesamtpakete bei Hoval aufgebaut und mit den Aktuatoren und Sensoren ausgerüstet worden. Zudem sind in sehr enger Zusammenarbeit mit dem IDSC die Elektroschemata den Bedürfnissen des Projekts angepasst, erstellt sowie laufend aktualisiert worden. Die von Hoval gebauten Schaltschränke sind anschliessend in die WKK-Versuchsanlagen eingebaut worden.

Die Gensets (Motor-Generatoreinheit) sind im Oktober 2016 von der ETH an Hoval geliefert worden. Um alle bisherigen Geometrieannahmen überprüfen und für PT 2-5 ein einheitliches Lagerungs-, Rahmen- und Hydraulikkonzept erproben und umsetzen zu können ist im Dezember 2016 bei Hoval PT5

(geplante Hoval Anlage) vorgezogen und als Zwischenversion mit einer vorläufig variablen Rahmen- und Hydraulikkonstruktion aufgebaut worden (siehe Abb. 5). Speziell die Erhebung der Rahmenbedingungen zur Hydraulik sowie Definition, Abklärung und Erprobung entsprechender Hydraulik Komponenten ist dabei im Mittelpunkt gestanden. Mehrere Umbauten sind in dieser Phase notwendig gewesen. Zudem ist der Schaltschrank der ETH Versuchsanlage PT1 verwendet worden, um mögliche Änderungen mittels eines ersten Schaltschranks feststellen zu können, damit die folgenden Schaltschränke für PT2-5 einheitlich gefertigt werden können. Die Weiterentwicklung der Elektroschemata und Schaltschränke ist in enger Zusammenarbeit zwischen Hoval und dem IDSC erfolgt. Nach Abschluss dieses Zwischenschrittes ist PT5 vorläufig stillgelegt und PT2-4 sind aufgebaut worden. Im Anschluss ist PT5 auf den gleichen Stand der Anlagen PT2-4 umgebaut worden.



Abb. 5: PT5 in der Zwischenversion Dezember 2016 mit vorläufigem Rahmen, Hydraulik und Wärmedämmung Abgastrakt. Der Schaltschrank ist auf einem gesonderten Rahmen montiert worden.

(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

Die im Dezember 2016 und Januar 2017 an der Zwischenversion der Anlage PT5 gewonnen Erkenntnisse haben zu konstruktiven Änderungen an Rahmen, Verkleidung (PT2), Hydraulik, Raumbedarf und räumliche Unterbringung der Sensoren, Aktuatoren und Elektronikbauteilen sowie dem Schaltschrankdesign geführt. Das ursprüngliche Designkonzept einer seriennahen WKK-Anlage aus dem Jahr 2016 (siehe Abb. 6) ist nicht mehr umsetzbar gewesen. Vor allem musste der Plan fallen gelassen werden



die Elektronikbauteile innerhalb der mBHKW-Einheit unterzubringen und ein eigener, bedeutend grösserer Schaltkasten wurde an der Aussenseite der eigentlichen mBHKW Verkleidung angebracht (siehe Abb. 8). Die unterschiedlichen Hydraulikanschlüsse sowie geometrisch sehr ungünstige und unregelmässige Position der Anschlüsse erhöhen den Aufwand für die gesamte Hydraulikführung.

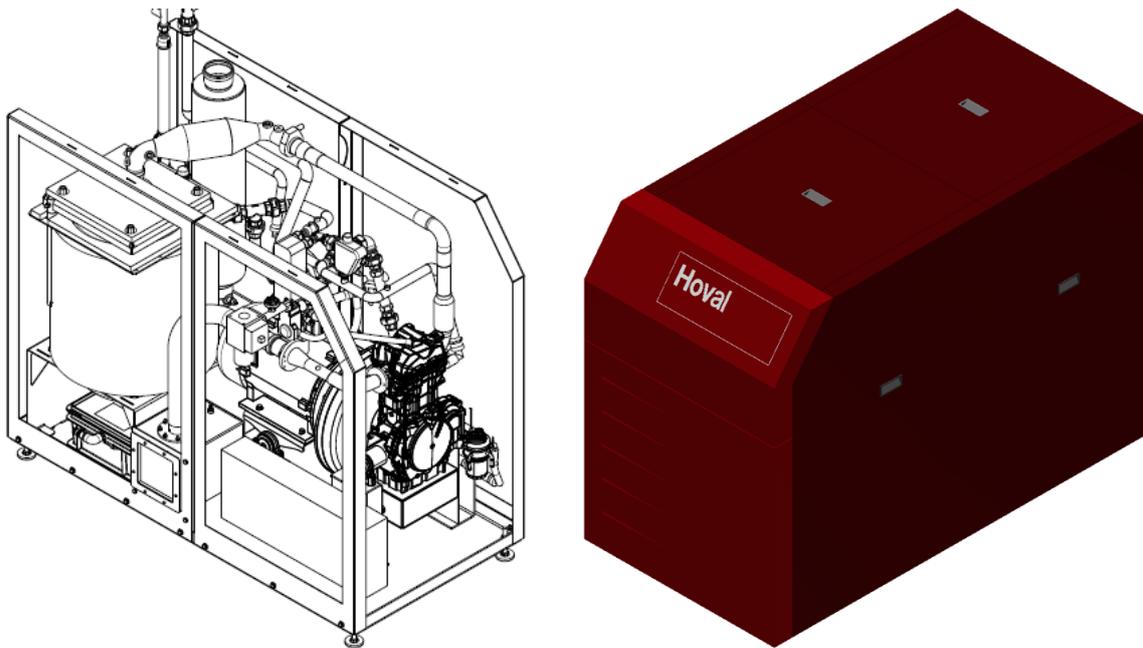


Abb. 6: Ursprünglicher Konstruktionsentwurf eines seriennahen WKK Prototypens mit Verkleidung 2016 (nicht umgesetzt auf Grund grösseren Platzbedarfs Hydraulik, Dämmung Abgastrakt, Elektronikbauteile und Schaltschrank)
(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

Dem grösseren Platzbedarf der Hydraulik, des Abgastrakts und der Elektronikkomponenten sowie des Schaltschranks ist mit einem überarbeiteten Entwurf Rechnung getragen worden (siehe Abb. 7). Gemäss diesen Entwürfen ist PT2 im März 2017 bei Hoval in Betrieb genommen worden. Bis Juli 2017 sind bei Hoval Wärme- und Schalltechnische Untersuchungen an PT2 durchgeführt worden. Auf Grund des zu gering gewordenen Ventilspiels ist diese Anlage im Juli 2017 stillgelegt worden. Im Mai 2017 sind die Anlagen PT3 und PT4 an sa-charging solutions ausgeliefert worden. An diesen Anlagen sind Versuche und Motorumbauten zur Dauerfestigkeit der Ventile und Nockenwellen durchgeführt worden. Auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse konnten im Frühjahr 2018 die Motoren umgerüstet werden.

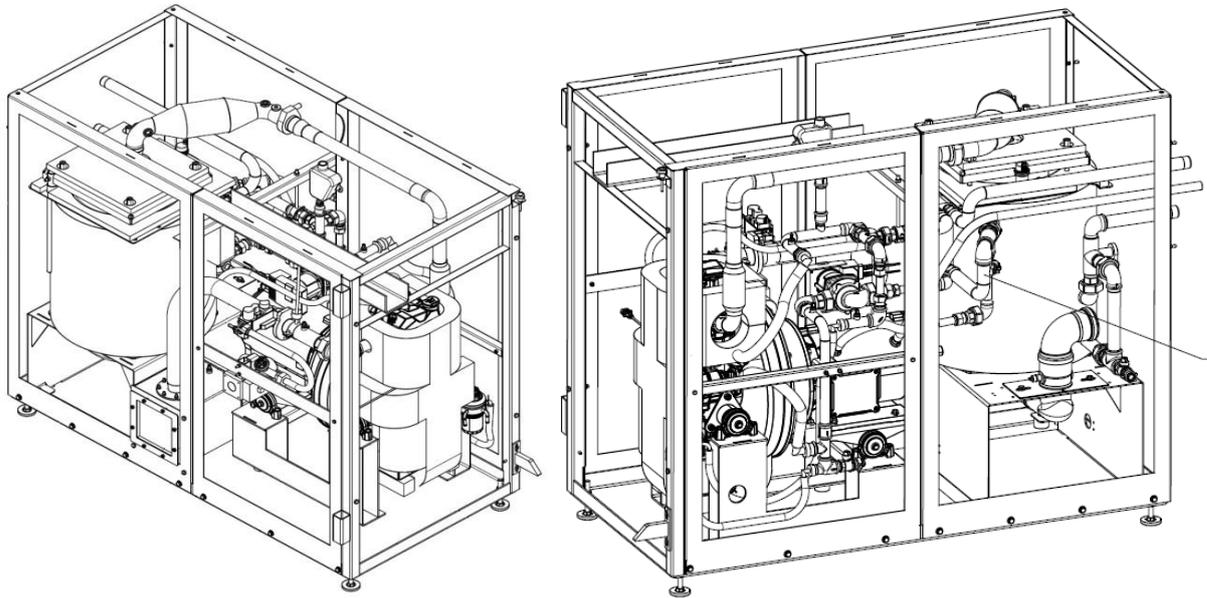


Abb. 7: Im Jahr 2017 realisierte Versuchsanlagen - PT2-5
(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

Die Anlage PT2 (siehe Abb. 8) ist 2017 nicht an Motorex ausgeliefert worden, da sie als einziges System zusätzlich mit einer Verkleidung mit Schall- und Wärmedämmung ausgestattet worden ist. Deshalb sind die schall- und wärmetechnischen Untersuchungen zwischen März und Juli 2017 bei Hoval an dieser Anlage durchgeführt worden.

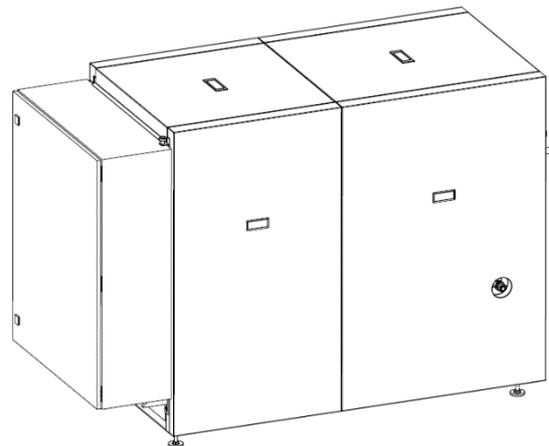


Abb. 8: Realisierte Verkleidung (unlackiert) und Konstruktionsentwurf der Verkleidung für PT2.



Inbetriebnahme und Betrieb der Anlagen PT2 – 5 an den dezentralen Standorten

(IDSC, ETHZ)

Die Inbetriebnahme der Prototypenanlagen stellt unter mehreren Gesichtspunkten ein wichtiges Werkzeug dar. Zum einen muss die Anlagensicherheit in diesem Schritt umfassend geprüft und im Hinblick auf sämtliche Betriebsbedingungen sichergestellt werden. Zum anderen können über spezifische Tests bereits in diesem Stadium individuelle Charakteristiken erkannt werden, die im späteren autonomen Betrieb unter Umständen durch das Zusammenspiel zwischen Betriebskonzept und Regelalgorithmen maskiert worden wären. In der Folge könnten Abweichungen im Verhalten der Anlagen nicht oder nur mit hohem diagnostischem Aufwand ursächlich untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde eine Inbetriebnahmeprozedur definiert, die die genannten Funktionsfelder (1) Sicherheit und (2) Anlagenverhalten durch ein mehrstufiges Programm aus Funktionstests abbildet und die generierten Messdaten anlagenübergreifend vergleichbar macht. Die initialen Unterschiede zwischen den Demonstrationsanlagen können auf diese Weise einfach ermittelt werden. Abb. 9 zeigt den definierten Ablauf, der bei den in Betrieb genommenen Anlagen befolgt wurde.

Im Wesentlichen gliedert sich der Ablauf in die Funktionsbereiche:

1. Funktionstest des Schaltkastens
2. Überprüfung des Anlagenverhaltens mit einer reduzierten Betriebssteuerung und nur grundlegenden Regelsystemen
3. Überprüfung des Anlagenverhaltens mit sämtlichen Regelsystemen und vollumfänglicher Betriebssteuerung (manueller Start)
4. Überprüfung der Anlagenkennwerte im Zuge eines Dauertests über mindestens 20h (autonomer Betrieb)
5. Probelauf über mindestens 1h am bestimmungsgemässen Aufstellort der Anlage (manueller Start)
6. Aktivierung des autonomen Betriebs gemäss geplanter Betriebszeiten

Die Redundanz der Punkte 3 & 5 ergibt sich aus der Tatsache, dass die Arbeitsschritte 1-4 am Ort des Schaltkasten- und Anlagebaus, den Räumlichkeiten der Hoval Aktiengesellschaft in Vaduz, durchgeführt werden, während die Schritte 4 & 5 am jeweiligen Aufstellort der Anlage unternommen werden. Dies ist zweckmässig, da zum einen notwendige Nacharbeiten direkt vom Anlagenmechaniker bzw. Schaltschrankbauer mit entsprechendem Werkzeug vorgenommen werden können. Zum anderen wird durch die mehrstufigen Funktionstests die Funktionssicherheit schon vor der Inbetriebnahme am Installationsort vollumfänglich bestätigt. Dies erleichtert die Diagnose von Problemen im Anschluss an die finale Installation, da die Ursachen zu einer hohen Wahrscheinlichkeit, bei Vernachlässigung von möglichen Transportschäden, in den geänderten Anschlussbedingungen am Installationsort liegen.

Die Funktionstests des Schaltkastens beinhalten die ganzheitliche Überprüfung der Verkabelung, die Funktion sämtlicher Sensoren sowie die signaltechnische Ansteuerung der Aktuatoren. Aus Sicherheitsgründen ist es notwendig, die Steckverbindungen der Aktuatoren zu trennen, um die Anlagensicherheit ohne einen physischen Start der Anlage zu überprüfen. Um dennoch die korrekte Funktionsweise des Schaltkastens über alle Betriebsbedingungen hinweg zu testen, wurde eine Hardware-in-the-loop Simulation entwickelt, die einen Start der Anlage simuliert. Beispielsweise kann so überprüft werden, ob der Start des Asynchronengenerators über den Schaltkasten in Y-Schaltung und der zeitgesteuerte Umschaltvorgang in Δ -Schaltung planmässig erfolgt. Ferner können Fehlfunktionen aller Sensoren ausgelöst und die in der Folge die korrekte Funktion des Not-Aus Verhaltens bestätigt werden. Dies kann



einerseits durch physisches Abstecken der Sensoren, sowie durch die simulationstechnische Einstellung von fiktiven Sensormessdaten geschehen. In einem letzten Schritt kann mithilfe der hinterlegten Anlagensimulation die korrekte Ansteuerung der Aktuatoren messtechnisch überprüft werden. Damit kann sichergestellt werden, dass alle aktuatorischen Grenzen eingehalten werden. Verlaufen sämtliche Tests erfolgreich, können die Aktuatoren mittels ihrer Steckverbinder mit dem Steuergerät verbunden werden.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Überprüfung des thermischen und hydraulischen Verhaltens mithilfe einer reduzierten Betriebssteuerung und vereinfachten Regelalgorithmen. Die Betriebssteuerung entspricht dem Stand aus Schritt 1. Es wird einzig die korrekte Einstellung des jeweiligen Betriebsmodus (Initialisierung, Ruhezustand, Start, Betrieb, Herunterfahren, Fehler) durchgeführt, sowie auf die Einhaltung der definierten Fehlereingriffsschwellen hin überwacht. Als Regelsysteme sind drei vereinfachte Regelungen aktiv. Das Kraftstoff-Luft-Gemisch wird auf stöchiometrischen Betrieb bei $\lambda=1$ eingestellt, um eine korrekte Funktion des Katalysators sicherzustellen. Hinsichtlich der Hydraulik sind zwei Regelungen basierend auf einem feedback-basierten PI-Regler aktiv. Ein PI-Regler regelt die Drehzahl der Wasserpumpe im Heizkreislauf, sodass sich eine Motorausgangstemperatur von $\vartheta_{Ma} = 82^{\circ}\text{C}$ einstellt. Ein zweiter PI-Regler regelt die Drehzahl der Wasserpumpe im Motorkühlkreislauf derart, dass die Temperaturdifferenz über dem Motor $\Delta\vartheta_{Motor} = \vartheta_{Ma} - \vartheta_{Mi}$ der Herstellervorgabe von 5°C entspricht. Die im System integrierten 3-Wege-Ventile werden auf vollen Durchlass im Hauptpfad eingestellt.

Diese vereinfachte Regelstrategie bewirkt, dass insbesondere der Vergleich mit weiteren Anlagen etwaige Unterschiede direkt offenlegt. Insbesondere die Vorlauftemperatur, die die spätere Zielgrösse des thermischen Verhaltens der Anlage darstellt, kann somit überprüft werden, da sie nicht direkt eingeregelt wird, sondern durch das hydraulische Anlagenverhalten ergibt. Bei Abweichungen kann somit zielgerichtet und pfadweise nach der hydraulischen Ursache gesucht werden. Bei den bisher erfolgten Inbetriebnahmen war die Ursache eindeutig auf nicht exakt eingestellte Drosselventile zurückzuführen. Diese Betriebsform kann jedoch ebenso für die allgemeine Diagnose während des Betriebs verwendet werden. Beispielsweise war bei einem Dauerlaufversuch von PT3 der Plattenwärmetauscher defekt. Mit der entwickelten vollwertigen Regelung wäre dies nur sehr aufwändig zu diagnostizieren gewesen, da die Regelungen kleine Abweichungen effektiv ausgleichen können. Mit der reduzierten Regelung konnte eindeutig erkannt werden, dass die Regelung der Motortemperatur ohne Beanstandungen erfolgte, die Wärmeabgabe an den Heizkreis über den Plattenwärmetauscher aber gestört war.

Werden bei der Inbetriebnahme in Schritt 2 keine signifikanten Abweichungen mehr festgestellt, wird die im Rahmen des Projekts entwickelte vollwertige Betriebssteuerung und -regelung implementiert. In diesem Schritt wird zwar das Anlagenverhalten insgesamt evaluiert, der Fokus liegt jedoch, anders als in Schritt 2, nicht auf der Identifikation von Abweichungen, sondern auf der Abstimmung der Regelungen. Der eingeführte Prozess ist so optimiert, dass erwartungsgemäss nur geringe Anpassungen vorgenommen werden müssen. Dies liegt daran, dass in Schritt 2 das Anlagenverhalten einer Referenz angepasst wurde, sodass in diesem Arbeitsschritt nahezu gleichwertige Bedingungen eingestellt sind, die als Grundlage für die Regelungen dienen.

Anschliessend wird jede Anlage einem Einlauftest von mindestens 20h unterzogen. Diese Massnahme ist zweckmässig, da somit sichergestellt wird, dass jede Anlage bei Auslieferung die spezifizierten Kenndaten erreicht und sowohl unter mechanischen als auch elektronischen Gesichtspunkten keine Fehler auftreten, die mit den kurzen Betriebszeiten der vorhergehenden Inbetriebnahmeschritte nicht sichtbar waren. Bei erfolgreichem Verlauf kann die Anlage im Anschluss abgebaut und zum Bestimmungsort transportiert werden.



Im Anschluss an den Wiederaufbau der Anlage wird am Bestimmungsort ein Probelauf von mindestens 1h durchgeführt. Mithilfe dessen kann festgestellt werden, ob entscheidende Unterschiede zwischen den Standorten vorherrschen, beispielsweise wesentlich unterschiedliche Drücke im Gasnetz oder stark schwankende Rücklauftemperaturen. Entsprechende Fälle bedingen einen erneuten Kalibrierungsschritt und eine Anpassung der Regelungen auf die geänderten Verhältnisse. Verlaufen die weiteren Funktionstests positiv, kann der autonome Betrieb der Anlage aktiviert werden und die Anlage somit in den Dauerbetrieb überführt werden.

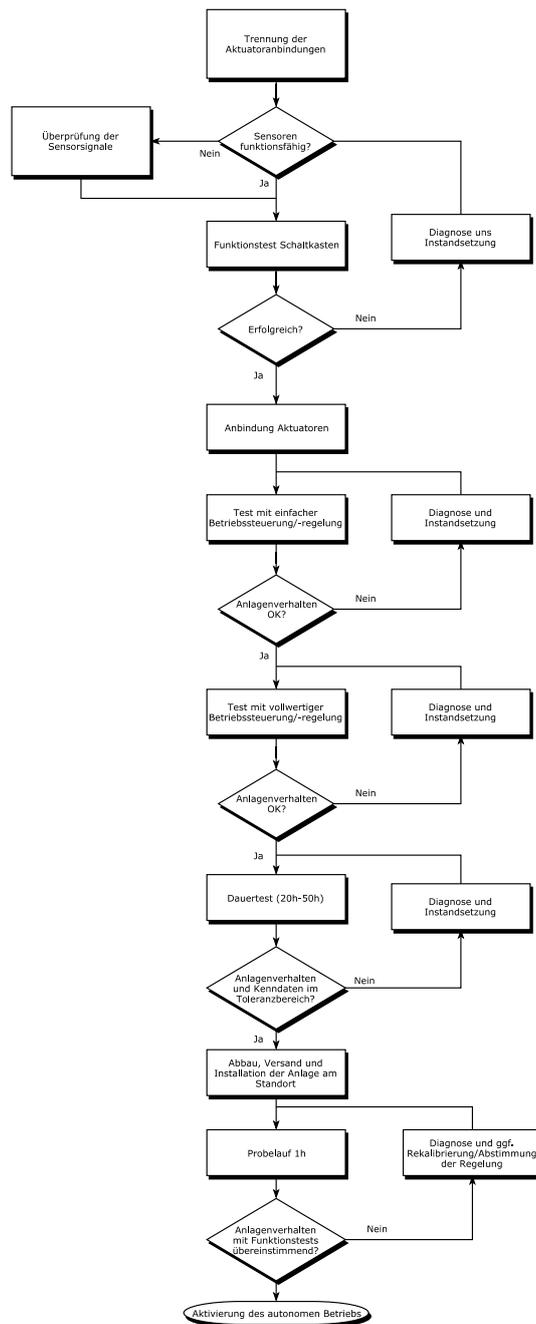


Abb. 9: Flussdiagramm der Inbetriebnahme-prozedur

Überarbeitung der Anlage bezüglich Dauerfestigkeit

Ventilspiel

(LAV, ETHZ)

Die Inbetriebnahme der Aladin-II-Anlagen PT1 - PT4 haben gezeigt, dass das Ventilspiel auf der Einlassseite nach jeweils 40-60h praktisch aufgehoben war. Eine Inspektion des Motors zeigte 2017 deutlich, dass der Verlust des Ventilspiels auf Verschleiss an der Dichtfläche zwischen Ventil und Sitzring zurückzuführen ist (siehe Abb. 10). Aus den Erfahrungen der Originalanwendung (Motorsport) mit Benzin war jedoch bekannt, dass sich das Ventilspiel bei einem dort typischen Lastkollektiv (ständig wechselnde Last und Drehzahlen von 1200 bis 8500rpm) nicht verändert. In der vorliegenden Anwendung unterscheidet sich der Kraftstoff (Erdgas) als auch das Lastkollektiv (ausschliesslich Vollast bei 3000rpm) massiv von der Originalanwendung.

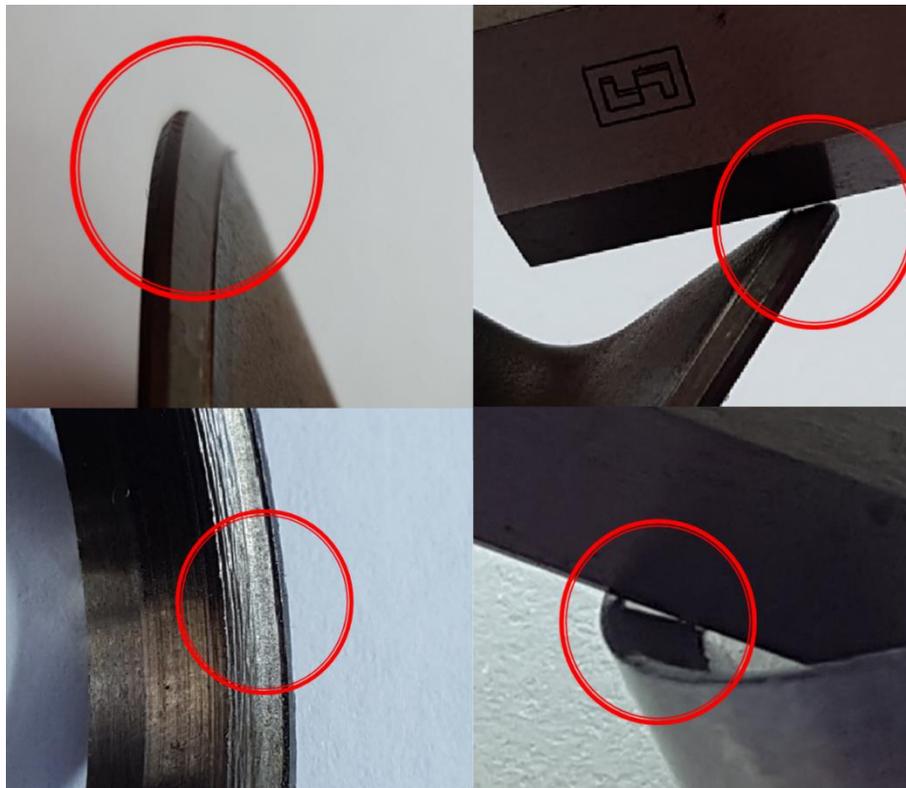


Abb. 10: Originaleinlassventil (oben) und -sitzring (unten) nach 106 h Gasbetrieb
Quelle: Swissauto Powersports

Eine simulativ und experimentell abgestützte Untersuchung im Jahr 2017 konnte die Ursachen für den Ventilspielverlust eingrenzen. Da Versuche mit halbem Spitzendruck und gleichem Lastkollektiv (also keine wechselnden Lasten und Drehzahlen) über 100h keinerlei Ventilspielverluste zeigten, konnte angenommen werden, dass die Ursache nicht hauptsächlich beim Lastkollektiv, sondern beim Brennstoff zu suchen war. Aus den Resultaten der FEM Rechnungen wurde klar, dass die relative Verschiebung zwischen Ventil und Sitzring zum entsprechenden Verschleiss geführt hatte. Anfallende Ablagerungen



im Benzinbetrieb verhindern den Verschleiss durch eine entsprechende Schmierwirkung. Für den Gasbetrieb konnte mit FEM Rechnungen gezeigt werden, dass eine Anpassung der Ventil- und Sitzringgeometrie (siehe Abb. 11, Konzept 2) zu einer Verminderung der mittleren Relativbewegung von über 80% führen wird. Hierdurch sollte dann auch der Verschleiss an den Dichtflächen entsprechend abnehmen. Abb. 11 zeigt das ursprüngliche Ventil ganz links und das schlussendlich umgesetzte verbesserte Ventil ganz rechts.

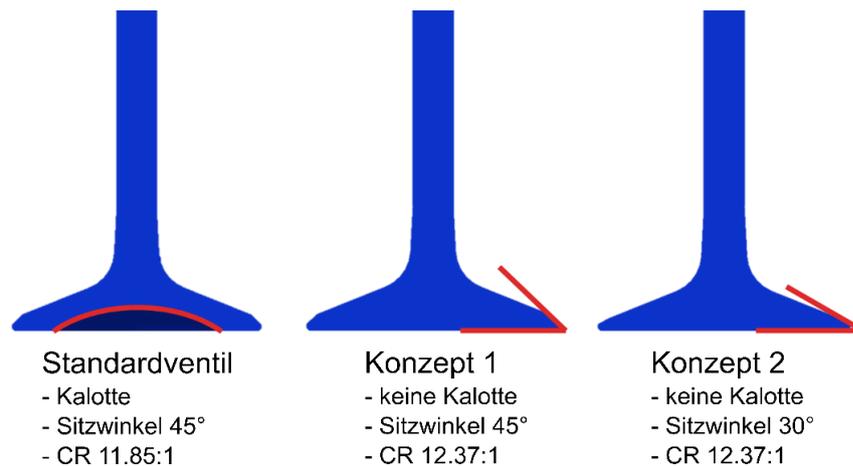


Abb. 11: Drei verschiedene Ventilkonzepte mit unterschiedlichen Sitzwinkeln und Steifigkeiten des Ventiltellers
Quelle: Swissauto Powersports

Ab Frühjahr 2018 konnten die neuen Ventile in den Anlagen PT 3 & 4 in Mellingen getestet werden. Abb. 12 zeigt den relativen Ventilspielschwund auf der Einlassseite für das Standardventil (orange) und die Konzept 2 Ventile (blau und grün). Während das Standardventil in weniger als 200h einen Ventilspielverlust von rund 20 Hundertstelmmillimeter produzierte, konnte mit dem Konzept 2 Ventil nach über 1000h nur einen solchen von maximal 5 Hundertstelmmillimetern nachgewiesen werden. Eine deutliche Verbesserung ist somit erwiesen. Ob das neue Ventil sogar dauerhaft ist, muss noch mit längeren Laufzeiten bewiesen werden.

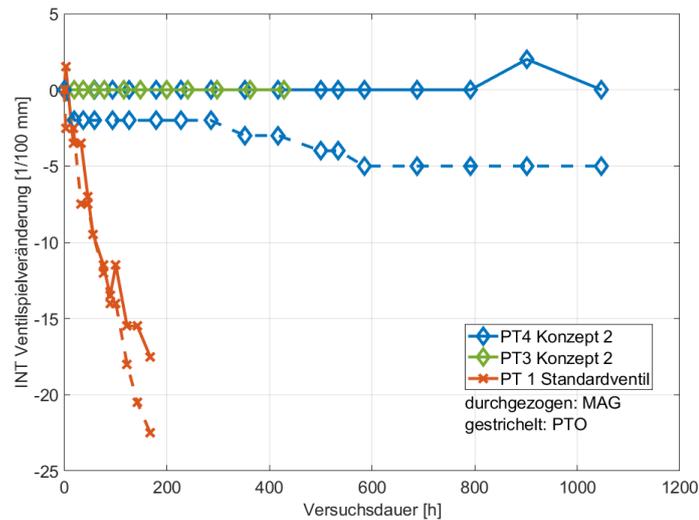


Abb. 12: Ventilspielveränderung auf der Einlassseite des Standardventils (orange) und der Konzept 2 Ventile (blau und grün), aufgetragen über die Laufzeit

Dauerfestigkeit der Nockenwelle

(LAV, ETHZ)

Die Nockenwellen der Aladin II Motoren werden aus den Nockenwellen des Serienmotors hergestellt. Das Originalprofil wird soweit runtergeschliffen, bis das optimierte Profil gemäss Auslegung aus dem Vorprojekt Aladin I erreicht ist [1]. Bis anhin ist man davon ausgegangen, dass die Schichtdicke der ursprünglichen Härtung genügend gross ist und somit auch die Aladin II Nockenwelle auf der Lauffläche eine genügende Härte aufweist. Deshalb wurde auf einen zusätzlichen Härtevorgang nach dem Schleifen verzichtet. In Abb. 14 ist zur Übersicht der Ventiltrieb der Aladin II Motoren dargestellt.

Während den ersten Motorentests 2016 wurde nach nur 20 Stunden Vollastbetrieb bei einer routinemässigen Ventilspielmessung ein starker Materialabtrag an einer Auslassnocke festgestellt (siehe Abb. 13). Als Ursache wurde eine ungenügende Härte festgestellt. Die Lösung des Problems war die Erweiterung des Herstellungsprozesses um einen weiteren Nitriervorgang nach dem Schleifen. Bei allen Motoren wurden die Nockenwellen durch jene mit dem neuen Herstellungsprozess ausgetauscht. Bis August 2018 wurden mit diesen Nockenwellen teilweise über 1600h gefahren und es konnte keinerlei Verschleiss mehr festgestellt werden. Das Problem der fehlenden Schichtdicke war somit durch diese Prozessenerweiterung erfolgreich behoben worden.

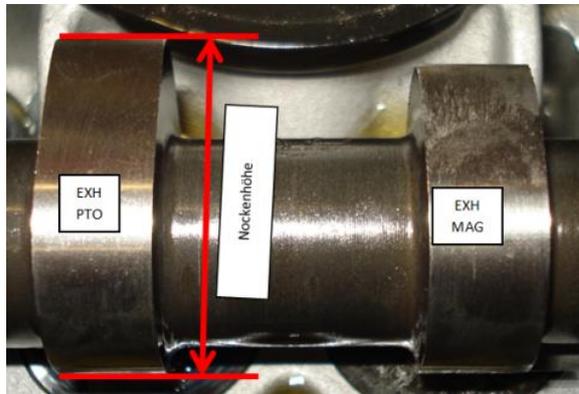


Abb. 13: Auslassnockenwelle nach 20 Vollaststunden. Bei der Nocke EXH MAG ist eine deutliche Abnutzung ersichtlich.

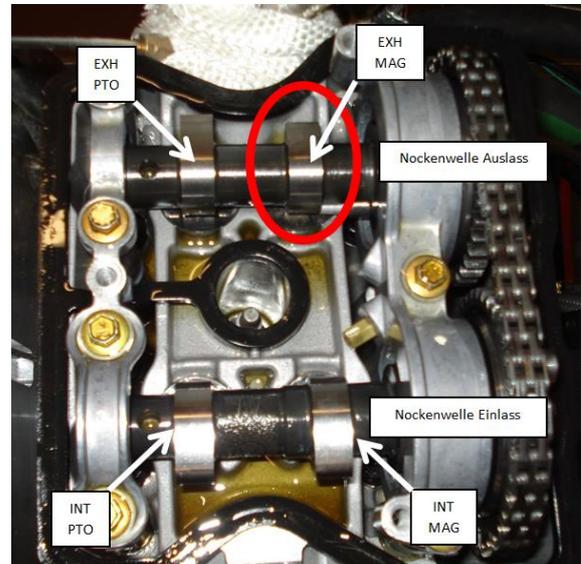


Abb. 14: Ventiltrieb des Aladin II Motors. Die beiden Nockenwellen treiben die zwei Einlass- und die zwei Auslassventile an.

Betrieb Dauerlaufanlagen und wichtigste Erkenntnisse

(sa charging solutions AG)

Die Anlagen PT3 (Motor 166) und PT4 (Motor 165) sind im Juli 2017 in Mellingen installiert worden, siehe Abb. 15. Bevor die Anlage in Betrieb genommen werden konnte, mussten gebäudeintern Vorkehrungen getroffen werden, wie z.B. Stromanschlüsse, Rohrleitungen für die Gasversorgung sowie die Abgasabführung zum Kamin vom Gebäude. Die Anlagen sind am Kühlkreislauf der sa-charging solutions AG angeschlossen, wodurch verschiedene Betriebszustände einer Gebäudeheizung simuliert werden können. Ein Kondensatablauf ist ebenfalls angebracht worden. Nach den notwendigen Vorkehrungen gebäudeseitig ist die Anlage komplett angeschlossen und betriebsbereit für Dauerlauf-Versuche.



Abb. 15: Anlagen PT3 und PT4 im Prüfstandraum bei sa-charging solutions AG.

Da es ein Entwicklungsprojekt ist, wurden die Dauerlaufversuche aus Sicherheitsgründen nur unter Beaufsichtigung durchgeführt und entsprechend tagsüber sowie werktags betrieben. Per Ende Oktober 2018 hat die Anlage PT3 mehr als 870 Stunden und PT4 mehr als 1700 Stunden Betriebszeit erreicht. Das GUI zur Bedienung der Anlagen ist bedienerfreundlich und übersichtlich. Die Versuche verliefen ohne grössere Unterbrechungen. Festgestellt wurden ein noch nicht ausreichend stabiles Aufstartverhalten und eine Gemischregelung, die zum Teil an definierte Adaptionränder gestossen sind. Bei der Gemischregelung wird anhand von hinterlegten Daten eine Vorsteuerung definiert und über einen Regler in einem vorgegebenen Bereich die Feinjustierung bewältigt. Die Tatsache, dass der Regler an die Grenzen des Regelbereichs – die sogenannten Adaptionränder – stösst, zeigt, dass entweder die Vorsteuerung zu unpräzise ist oder der Regelbereich für die Feinjustierung zu gering gewählt wurde. In dem konkreten Falle ist auch der Venturimischer im übertragenen Sinn Teil der Vorsteuerung. Hier müsste allenfalls die Auslegung revidiert werden. Auffällig war das Verhalten bei den $\frac{1}{2}$ Last versuchen. Grundsätzlich müsste via Venturimischer ein hinreichendes Mass an Stabilität erreicht werden. Die Anlagen reagierten zu Beginn sensibel auf Stromnetzschwankungen. Eine Anpassung der Schwellwerte für die Netzüberwachung hat dieses Phänomen aber gelöst. Als Projektteil des Dauerlaufes und auch zur Analyse des Grundmotorzustands wurden in periodischen Zeitabständen Öl-Proben abgegriffen und Ventilspielmessungen durchgeführt. Der vorgesehene Ablasshahn ermöglicht eine handliche und rasche Entnahme einer Öl-Probe.

Während den Dauerlaufversuchen wurden Ventilspielmessungen stets von der gleichen Person und mit gleichem Messverfahren durchgeführt. Nach etlichen Messungen und dementsprechendem Ein- und Ausbau vom Ventildeckel mussten die Ventildeckeldichtungen aufgrund Undichtigkeit ersetzt werden.

Während des Betriebs wurde festgestellt, dass der Siphon der Kesselkondensat-Ableitung noch nicht ausreichend robust bezüglich Dichtigkeit und Funktion ist. Es ist davon auszugehen, dass das hauptsächlich ein Resultat der pulsierenden Strömung und allenfalls durch Schwingungsanregung ist. Durch die erhöhte Entstehung von Kondensat während der Kaltstartphase lief Kondensat über und sammelte sich neben der Anlage (Abb. 16). Dies soll mit einer neuen Installation vermieden werden, so dass



trotzdem robuste Laufzeiten dargestellt werden können. Für ein kommerzielles Produkt müsste die Konstruktion des Kondensatablaufs verbessert werden. Nach Erreichen der Betriebstemperatur verschiebt sich die Entstehung von Kondensat Richtung Abgastrakt und sich relativ viel Kondensat in der Abgasventilation des Prüfstandraums sammelt. Deshalb wurde ein zusätzlicher Kondensatablauf installiert.

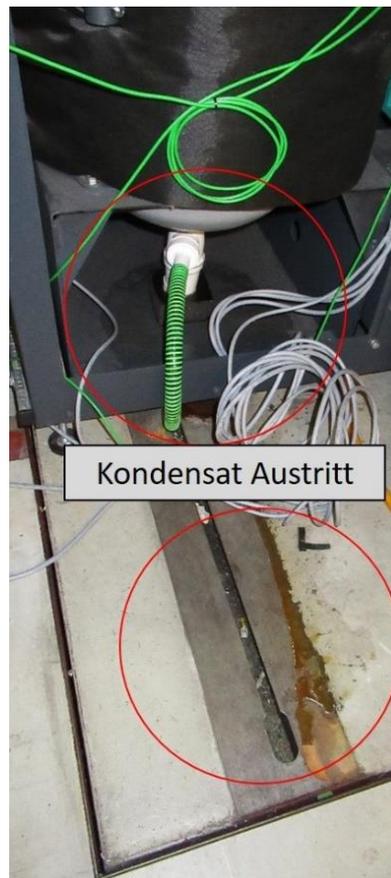


Abb. 16: Austreten von Kondensat, Undichtigkeit beim Siphon – Siphon hat sich gelockert

Durch die Schwingungsanregungen des 1-Zylinder Motors haben sich die Schrauben vom Abgastrakt beim Wärmetauscher während des Betriebs gelöst und mussten nachgezogen werden (Abb. 17). In einem weiteren Schritt sollte im Zusammenhang mit Akustik / Körperschallthemen auch die mechanische Dämpfung des Systems genauer untersucht werden. Um wenig Wärme zu verlieren, sind Motor und Abgastrakt isoliert. Während des Dauerlaufs wurden verschiedene Materialien zur Isolation eingesetzt. Genauer zu den verwendeten Materialien wird im folgenden Kapitel „Isolation Abgastrakt“ behandelt. Trotz Isolation sind die Wärmeströme in die Umgebung resp. Box des BHKWs noch zu hoch für einen gekapselten Betrieb.



Abb. 17: Übergang vom Abgastrakt in den Wärmetauscher

Korrosionsbeständigkeit des Abgastraktes

(sa charging solutions AG)

Die Isolation vom Abgastrakt muss überarbeitet werden. Aus Erfahrung an Turbolader Prüfständen ist bekannt, dass die Kombination von Isolation und Materialwahl der Rohre entscheidend ist. Bei isolierten Rohren nähert sich die Wandtemperatur der Gastemperatur an. Die hohe Temperatur der Rohrwand beschleunigt den Oxidationsprozess derart, dass in kurzer Zeit ein grosser Materialabtrag stattfinden kann. Diese Erscheinungen konnten auch beim Abgastrakt eines BHKWs beobachtet werden (Abb. 18). Im Hinblick auf ein kommerzielles Produkt muss der Wärmestrom in die Box des BHKWs unumgänglich signifikant reduziert werden. Dies wird im späteren Kapitel „Untersuchung des Wärmehaushaltes der Gesamtanlage“ genauer behandelt.

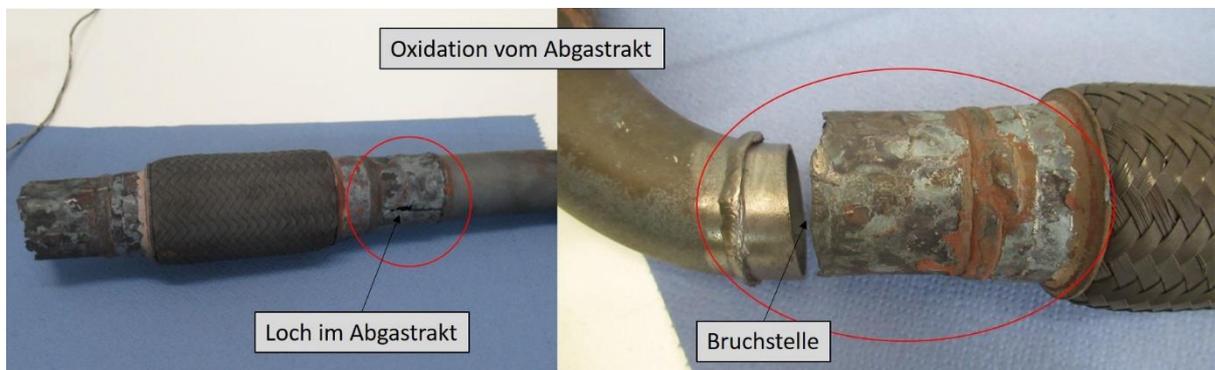


Abb. 18: Abgastrakt vom PT4, Teil vom Abgastrakt stark oxidiert



Isolation Abgastrakt

(sa charging solutions AG)

Für eine optimale Abgasnachbehandlung mittels eines standardmässigen 3-Wege-Katalysators muss das Abgas eines Gasmotors eine Temperatur von mindestens 400-500 °C einhalten. Um die Wärmeverluste zu minimieren wurde der Abgastrakt isoliert. Nicht alle Materialien sind für einen Dauerbetrieb mit hohen Temperaturen geeignet. Bei den Dauerlauf Anlagen PT3 und PT4 wurde in einem ersten Versuch eine Glaswolle-Isolation eingesetzt, siehe Abb. 19. Nach kurzer Zeit zeigte sich, dass die Glaswolle diese Temperaturen nicht dauerhaft aushalten kann und sich auflöste.



Abb. 19: Isolation vom Abgastrakt mit Glaswolle

In einem zweiten Versuch wurde der Abgastrakt mit einem Hitzeschutzblech (1-lagig) eingewickelt, siehe Abb. 20. Das Schutzblech zeigte auch bei hohen Temperaturen kein negatives Materialverhalten auf. Der Temperaturverlust vom Motorausstritt bis zum Katalysator hingegen war höher als bei der ersten Variante. Aufgrund des Wärmeverlustes und der aufwendigeren Handhabung bei Inspektionen war die Anforderung an eine neue Isolation, dass sie Temperaturen bis mind. 800°C standhalten soll und auch für Inspektionen am Abgastrakt viel handlicher bzw. praktischer sein muss.

Daraufhin wurden Keramikmatten mit einer Umhüllung aus Leichtmetallblech verwendet, siehe Abb. 21. Die Keramikmatten können bei Temperaturen bis 1100 °C eingesetzt werden. Dank der Halbschalen aus Leichtmetall kann die Isolation mit einfachen Handgriffen entfernt werden und erleichtert somit die Inspektion des Abgastraktes. Auch nach über 700 Stunden Betrieb ist die Isolation in ausgezeichnetem Zustand. Der Wärmeverlust ist sehr gering und erfüllt die Anforderungen für eine optimale Abgasnachbehandlung der Anlage.



Abb. 20: Abgastrakt in Hitzeschutzblech eingewickelt.

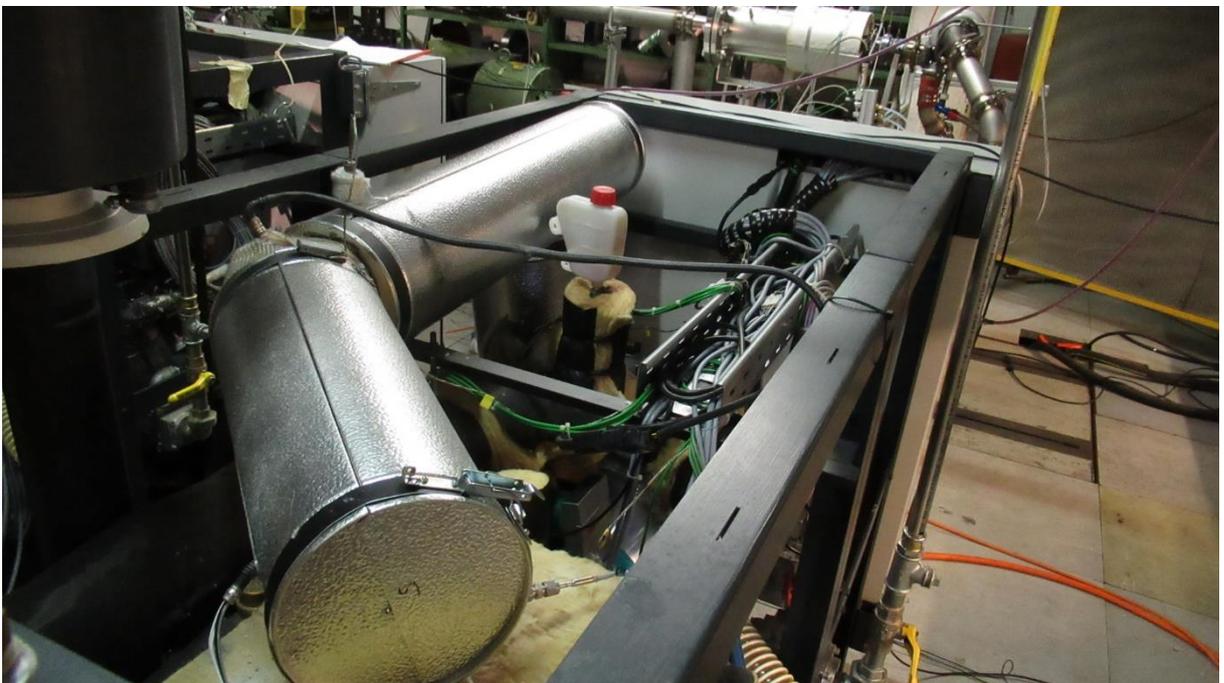


Abb. 21: Isolation des Abgastraktes mit Keramikmatten mit einer Umhüllung aus Leichtmetallblech.



Schallemissionen der Ansaugung

(sa charging solutions AG)

Bei den Anlagen PT3 und PT4 war im ursprünglichen Design kein dämpfendes Element in der saugseitig geplant. Nach der Inbetriebnahme waren die Lärmemissionen der Anlagen deutlich höher als erwartet. Deshalb wurde nachträglich der Serien-Luftfilterkasten vom 1-Zylinder Motor verbaut (siehe Abb. 22). Die Geräuschbelastung wurde dadurch im Betrieb um bis zu 12 dB reduziert. Der Luftfilterkasten wird in zukünftigen Konstruktionen berücksichtigt und mit eingebaut. Die Tabelle 3 zeigt die dB-Messungen der Ansaugeräusche bei verschiedenen Entfernungen an der Anlage PT4.



Abb. 22: Serien-Luftfilterkasten vom Motor auf PT4 installiert.

Entfernung [m]	Ohne Filterkasten [dB]	Mit Filterkasten [dB]
0.2	104.6	92.5
2	93.1	87.1
5	88.4	85.9

Tabelle 3: dB-Messung der Ansaugeräusche im Betrieb mit und ohne dämpfendes Element in der Ansaugung

Überarbeitung und Weiterentwicklung der BHKW-Steuerung

(IDSC, ETHZ)

Im Rahmen des Projekts wurde parallel zum zugehörigen Forschungs- und Entwicklungsprojekt (SI/501278-01) eine zielgerichtete Betriebssteuerung entwickelt. Die ursprüngliche Zielsetzung war, neben der allgemeinen Steuerung und der Umsetzung von Sicherheitsfunktionen, besonders auf einen autonomen Betrieb und die Umsetzung von Fernwartungsmöglichkeiten ausgerichtet. Die einzelnen Funktionen werden im Folgenden im Hinblick auf die Gesamtanlage beschrieben. Detailliertere Informationen sind dem Bericht des Forschungs- und Entwicklungsprojekts SI/501278-01 zu entnehmen.

Anlagensteuerung

Im Rahmen des AP4 wurde eine Anlagensteuerung konzeptualisiert, entwickelt und implementiert, die einen stabilen und sicheren Betrieb der Pilotanlagen gewährleistet. Als Eingangsgrösse fungiert ein übergeordnetes An- bzw. Abschaltsignal, dass von der Heizungssteuerung der Hoval Aktiengesellschaft übertragen wird. Zu Forschungszwecken und zum Einsatz im Rahmen von Dauerlaufuntersuchungen kann dieses Steuersignal zudem entweder manuell von einem Prüfstandsverantwortlichen oder von der autonomen Anlagensteuerung gesendet werden. Das zugrundeliegende Konzept beruht auf der Realisierung verschiedener Betriebsmodi, die sämtliche Anlagenzustände berücksichtigen und die jeweiligen Anforderungen an das Anlagenverhalten optimal umsetzen (vgl. Abb. 23). Dadurch können je nach Betriebsmodus unterschiedliche Fehlereingriffsschwellen definiert oder Aktuatoren aktiviert bzw. deaktiviert werden. Ein integriertes Sicherheitskonzept übernimmt sämtliche Überwachungs- und Eingriffsaufgaben, während der in enger Zusammenarbeit mit der Hoval Aktiengesellschaft entwickelte Schaltkasten die Aufgaben anlagenseitig umsetzt.

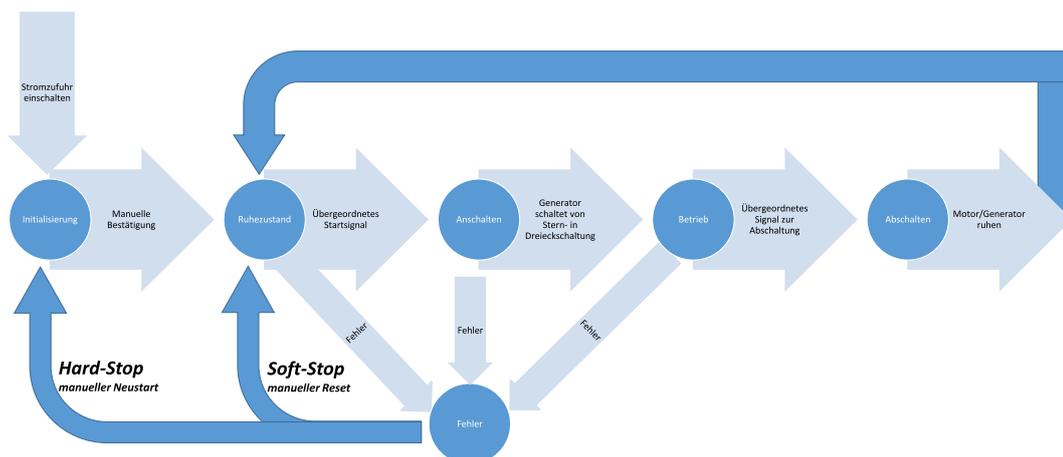


Abb. 23: Betriebszustände des Aladin II mBHKW

Das Betriebs- und Sicherheitskonzept wurde auf der Motorsteuerung als übergeordnete Sicherheitseinheit implementiert. Ein autonomer Betrieb der Anlage kann somit gewährleistet werden. Zur Anlagenkontrolle sowie zur Steuerung im Fehlerfall wurde eine Prüfstandssteuerung entwickelt, die auf einem



Prüfstandscomputer im Kontrollraum implementiert wird und einen manuellen Eingriff auf das anlagenseitig verbaute Steuergerät und somit die reguläre Betriebssteuerung zulässt (vgl. Abb. 24). Über diese Software kann so zum einen ein Neustart initialisiert werden, wenn zuvor ein Fehlerfall eingetreten ist. Zum anderen kann eine vollständige Kontrolle aller Betriebsparameter vorgenommen werden, sodass der zuständige Anlagenverantwortliche jederzeit alle wesentlichen Anlagen- und Prozessparameter überprüfen kann. Eine Übersicht der funktionellen Möglichkeiten ist in Tabelle 4 dargestellt.

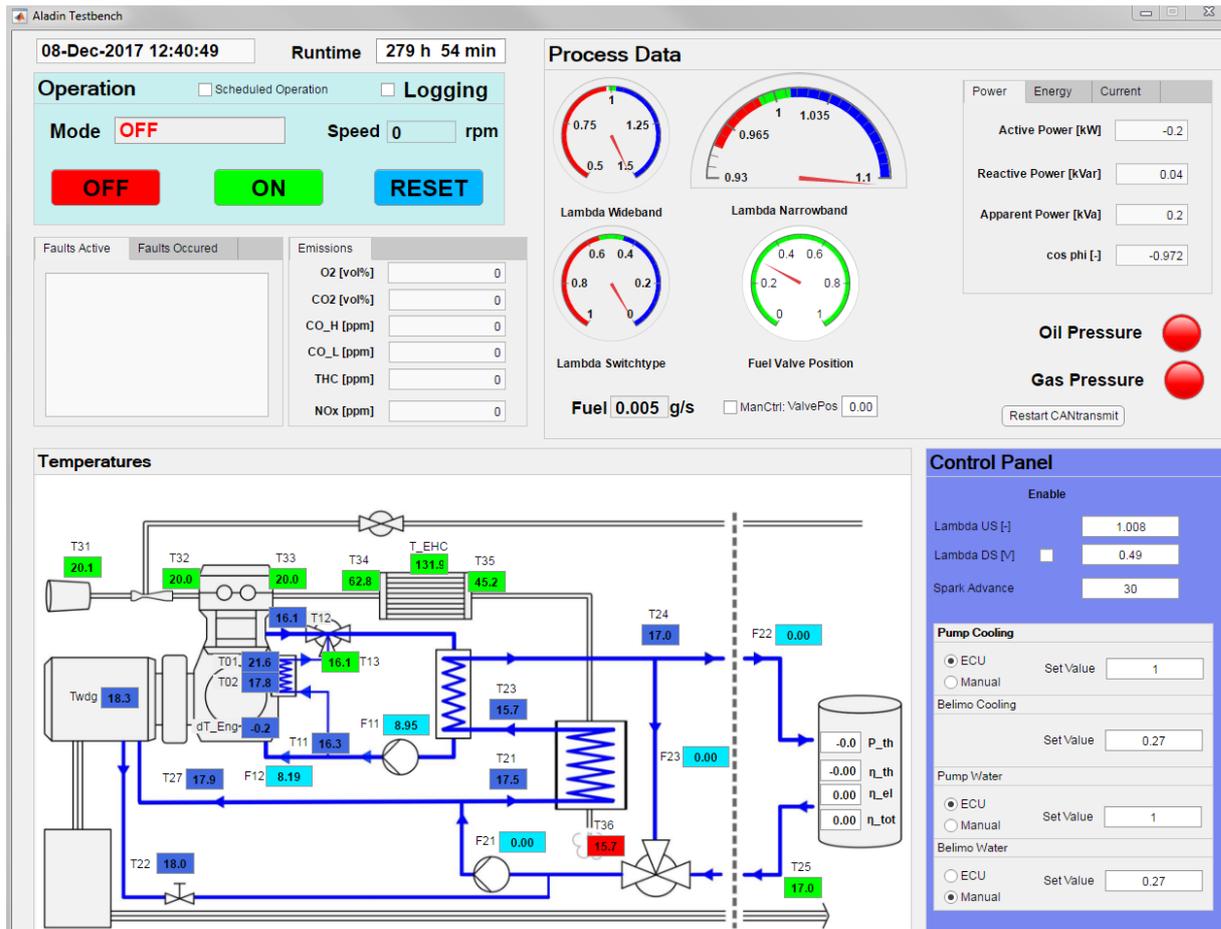


Abb. 24: Bedienoberfläche der Prüfstandssteuerung

Neben der Bedienoberfläche wurde eine Vielzahl weiterer Funktionen entwickelt, die die Übersichtlichkeit und Bedienbarkeit massgeblich verbessern. Als Beispiel seien an dieser Stelle der automatisierte Versand einer E-Mail an den Anlagenverantwortlichen im Fehlerfall, sowie der autonome Betrieb der Anlage auf Basis eines flexibel anpassbaren, kalendarischen Betriebsplans genannt. Beide Funktionen minimieren die Anforderung an eine persönliche Kontrolle der Anlage, sodass die Laufzeit nicht von der persönlichen Anwesenheit einer verantwortlichen Person abhängig ist. Eine manuelle Überprüfung der Anlagenhardware ist in regelmässigen Abständen im aktuellen Prototypenstadium dennoch unerlässlich, da mechanische Defekte nicht ausgeschlossen werden können.



Funktion	Zweck
ON, OFF, RESET	Manueller Start/Stop der Anlage, sowie das Zurücksetzen in den Ruhezustand im Fehlerfall
Date	Aktuelles Datum und Uhrzeit
Runtime	Aktuelle Gesamtlaufzeit der Anlage
Mode	<p>Aktueller Betriebsmodus der Anlage:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Initialization: Anlage wurde eingeschaltet und wird initialisiert • Off: Anlage befindet sich im Ruhemodus und ist bereit zum Start • Startup: Anlage wurde gestartet und befindet sich im Generatorbetrieb • Operation: Einschalten Zündung/ Lambdaregelung, Anlage läuft • Coast: Abschaltvorgang aktiviert, Motor und Generator laufen aus • Error: Fehlerfall
Error Active, Error Occured	<p>Fehlerkontrolle:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Active: Anzeige aktuell aktiver Fehler • Occured: Anzeige nicht-aktiver, aber aufgetretener Fehler
Lambda-wideband	Niedrig aufgelöstes Signal der Lambda-Breitbandsonde vor dem Katalysator
Lambda-narrow-band	Hoch aufgelöstes Signal der Lambda-Breitbandsonde vor dem Katalysator
Lambda-switchtype	Spannungssignal der Diagnosesonde (Sprungsonde) nach dem Katalysator in [V]
Power Energy Current	<p>Kontrolle elektrischer Anlagenparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aktuelle Wirkleistung des Generators • Aktuelle Blindleistung des Generators • Aktuelle Scheinleistung des Generators • Überwachung der Ströme der verschiedenen Netzphasen • Produzierte elektrische Energie in [kWh] seit Inbetriebnahme
Fuel Valve Position	Aktuelle Position des Gasregelventils und Möglichkeit zur Übersteuerung
Oil Pressure	Kontrolle des Öldrucks (via Öldrucksensor)
Gas Pressure	Kontrolle des Gasdrucks (via Gasdruckwächter)
Hydraulic Data	Schaubild des aktuellen Anlagenschemas mit positionsgerechter Anzeige sämtlicher Temperaturen und Durchflüsse
Control Panel	<p>Manuelle Eingriffsmöglichkeit zur Veränderung des Betriebsverhaltens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lambda US: Vorsteuerwert der Lambdaregelung (Regelung) • Lambda DS: Vorsteuerwert der Lambdaregelung (Diagnose) • Spark Advance: Vorgabe des Zündwinkels in [°KW vor OT] • Pump Cooling: manuelle Eingabe der Pumpendrehzahl in [0.01%] • Pump Water: manuelle Eingabe der Pumpendrehzahl in [0.01%] • Belimo Water: manuelle Eingabe der Position des Regelkugelhahns

Tabelle 4: Überwachungs- und Eingriffsfunktionen der Prüfstandssteuerung



Fernwartungszugriff

Zu Diagnose- und Fernwartungszwecken wurde eine Remote-Access Verbindung eingerichtet, die es den beteiligten Instituten der ETH Zürich erlaubt eine Anlagenkontrolle durchzuführen und Unterstützung bei der Diagnose bereitzustellen. Die Verbindung erfolgt auf der Basis einer Remote-Desktop-Verbindung. Diese Verbindung ermöglicht einen Fernzugriff auf die lokale Benutzeroberfläche, sodass umgehend alle relevanten Informationen eingesehen werden können. Dies ermöglicht eine effiziente Hilfestellung bei diagnostischen Aufgaben, da die überwiegende Anzahl von Problemen im Anlageverhalten anhand der Prozessgrößen in der Benutzeroberfläche erkennbar sind und eine aufwändige Auswertung der Messdaten nur bei Bedarf erfolgen muss.

Datensicherung

Zum Zweck der Datensicherung und Analyse der Versuchsergebnisse wurde der in der Frühphase des Projekts eingerichtete zentrale Projektspeicher (basierend auf dem „Polybox“-Service der ETH Zürich) erweitert und strukturell den Anforderungen an eine Massenspeicherung angepasst. In der aktuellen Form werden sämtliche aufgezeichneten Daten automatisiert an diesen zentralen Projektspeicher übertragen, sodass eine automatisierte Auswertung und Analyse aller betriebenen Anlagen erfolgen kann. Aufgrund der instantanen Übertragung in die Polybox-Cloud ist die Datensicherung selbst bei Ausfall eines Prüfstandcomputers bis zu diesem Ereignis gegeben. Der Datenverlust wird somit auf ein Minimum reduziert. Ferner verhindert eine Backup-Funktionalität, dass Daten ungewollt unwiderruflich überschrieben werden.

Zum Zweck der Reduzierung des Datenvolumens wurde eine flexible Speicherung der Daten anhand der jeweiligen Prioritätsstufe und des jeweiligen dynamischen Verhaltens eingerichtet. Beispielsweise ist es nicht zweckmässig Temperatursignale mit einer Rate von wenigen Millisekunden aufzuzeichnen, während für verbrennungsmotorische Daten, mit Ausnahme der Temperaturen, eine Kontrolle im Bereich weniger Millisekunden notwendig ist. Die Aufzeichnung wurde dementsprechend so gestaltet, dass nach Anlegen einer neuen Datei, sämtliche Daten gemäss ihres Betriebsbereichs aufgezeichnet werden. Für das Beispiel der Temperaturen bedeutet dies ein Intervall „1 Sekunde“, während verbrennungsmotorische Daten in einem Intervall von „10 Millisekunden“ aufgezeichnet werden. In einem zweiten Schritt wird nach Abschluss des aktuellen Aufzeichnungsintervalls eine Datenreduzierung durchgeführt, wenn in diesem Zeitraum kein Fehler ausgelöst wurde. Die Messdatei wird dann für die Langzeit-speicherung mit einem sekundlichen Aufzeichnungsintervall belegt und final abgelegt.

Autonomer Betrieb

Die Möglichkeit zum autonomen Betrieb wird zum einen durch die umgesetzten, internen Sicherheitsfunktionen (vgl. Projektbericht SI/501278-01), sowie durch die implementierte Funktion der Prüfstandssteuerung gegeben. Über die grafische Benutzeroberfläche (vgl. Abb. 24) kann der Punkt „Scheduled Operation“ angewählt werden. Darüber wird eine Funktion aufgeschaltet, die einen kalendarischen betriebsplan umsetzt. Der Anlagenverantwortliche kann somit die gewünschten Betriebszeiten in einen Kalender eintragen. Das mBHKW startet und stoppt dann auf Basis dieser Angaben selbstständig. Zum Zweck der Dauerlaufversuche wurde diese Funktion umfassend getestet. Da diese Funktion einzig den Start- und Abschaltvorgang zeitlich steuert, sämtliche Sicherheitsfunktionen aber vom anlagenseitigen Steuergerät übernommen werden, bewirkt auch ein Ausfall des Prüfstandscomputers keine Beeinträchtigung der Funktion. Da zum Zeitpunkt des Starts ebenso der geplante Zeitpunkt des Abschaltens an das Steuergerät übertragen wird, ist ausgeschlossen, dass die Anlage von einer verantwortlichen Person gestoppt werden muss.

Untersuchung des Wärmehaushaltes der Gesamtanlage

(Hoval Aktiengesellschaft)

Die Untersuchungen des Wärmehaushalts an der Anlage PT2 sind bei der Hoval Aktiengesellschaft zwischen März und Juli 2017 durchgeführt worden. Am 13.07.2017 sind auf Grund des bis dahin zu geringen Ventilspiels die Versuche eingestellt worden.

Die Reduktion thermischer Verluste (Konvektion und Strahlung) durch Dämmmaterialien erhöht bei hohen Temperaturen die thermische Materialbelastung der Hauptkomponenten. Auch die Dämmmaterialien müssen diesen Belastungen widerstehen, aber auch der platzsparenden Konstruktion – Spannungsfeld Wärmeleitwert vs. Temperaturbeständigkeit - sowie den Sicherheitsanforderungen – z. B. Berührtemperatur - Rechnung tragen.

In Abb. 25 werden die Hauptkomponenten bzw. Baugruppen zur Betrachtung des Wärmehaushalts definiert: Abgaswärmeübertrager (1), Abgastrakt mit Katalysator (2), WKK interne Hydraulik (3), Motor (4), Schwungradgehäuse (5), elektrischer Generator (6).

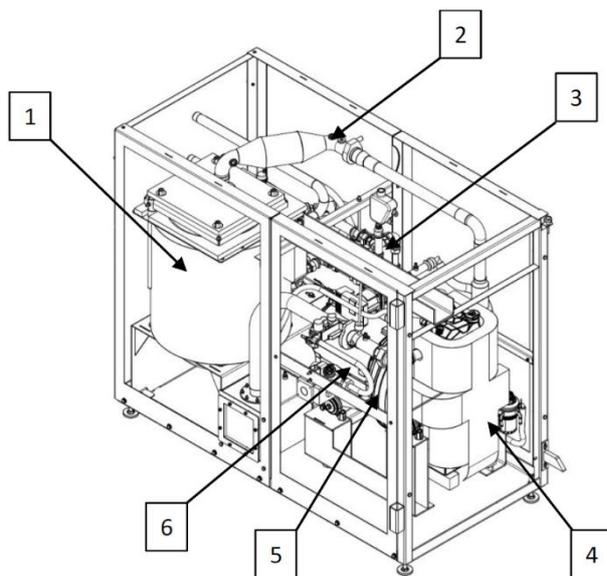


Abb. 25: Konstruktion PT2 bis PT5

In der Darstellung ist die Dämmung des Motors eingezeichnet. Die Dämmung des Abgastrakts fehlt.

(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

Abgaswärmeübertrager (1), Generator (6), Hydraulikkomponenten (3) und Motor (4) sind Wasser durchströmt. Für die Aussenseite dieser Bauteile kann vorerst vereinfacht die Wassertemperatur der zugehörigen Hydraulik angenommen werden. Der hier auftretende Temperaturbereich kann mit regulär in der Heiztechnik verwendeten Dämmmaterialien gedeckt werden.

Prognostizierte Abgastemperaturen von 700 bis 750°C, bei Benzinbetrieb sogar 800°C, stellen besondere Herausforderungen an Material und Dämmung des ungekühlten Abgassystems dar. Bei ständig unter Beobachtung stehenden, ungekapselten Laboranlagen PT1, PT3 und PT4 kann zwecks Zugänglichkeit und Vereinfachung die Dämmung des Abgastrakts reduziert oder teilweise darauf verzichtet werden. Ein einfacher Berührschutz reicht in diesen Fällen. Der Abgastrakt der Anlagen PT2 und PT5



soll für den autonomen Betrieb stärker gedämmt werden. Dadurch erhöht sich die thermische Belastung des Materials der Abgasleitungen selbst. Auf Grund des Platzmangels innerhalb der Verkleidung der Anlagen PT2 und PT5 ist ein schichtweiser Aufbau (drei Dämmschichten – Aufbau siehe Abb. 26) entlang des Abgastrakts aufgebaut und in mehreren Messungen überprüft worden. In Abb. 27 sind die Messpunkte entlang des Abgastrakts eingezeichnet und in Abb. 28 wird die Entwicklung der Oberflächentemperatur an den Messpunkten bei zunehmender Wärmedämmung dargestellt.

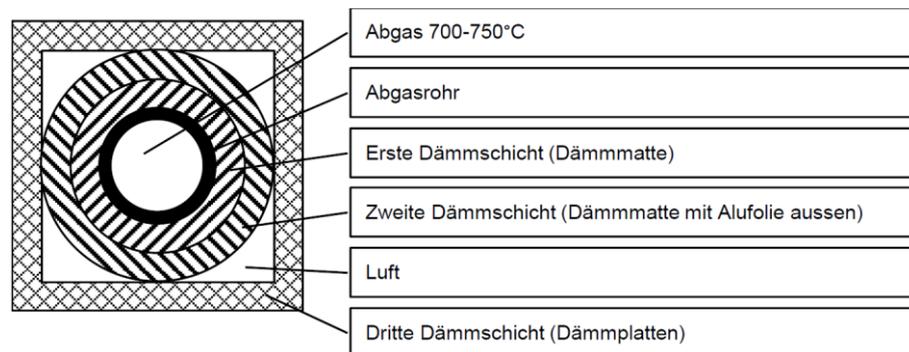


Abb. 26: Systematischer Aufbau der Dämmschichten des Abgastrakts PT2 und PT5.
(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

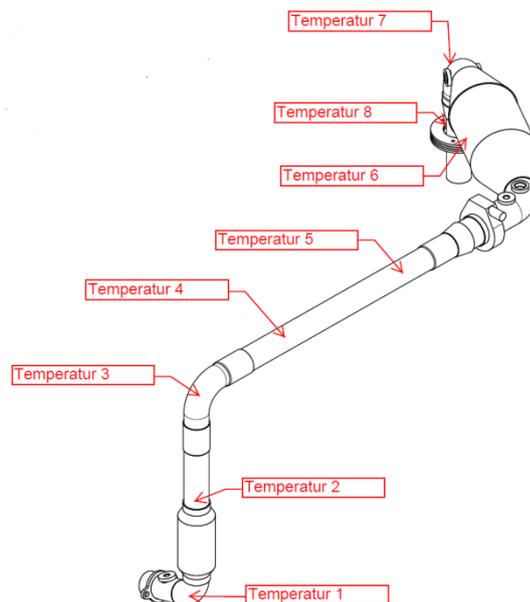


Abb. 27: Ungedämmter Abgastrakt der Anlagen PT2 bis PT5 mit Kennzeichnung der Temperaturmesspunkte. Links unten wird das Abgas aus dem Motor in den Abgastrakt eingeleitet, rechts oben befindet sich der Katalysator und die Anschlussstelle an den Abgaswärmeübertrager.
(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

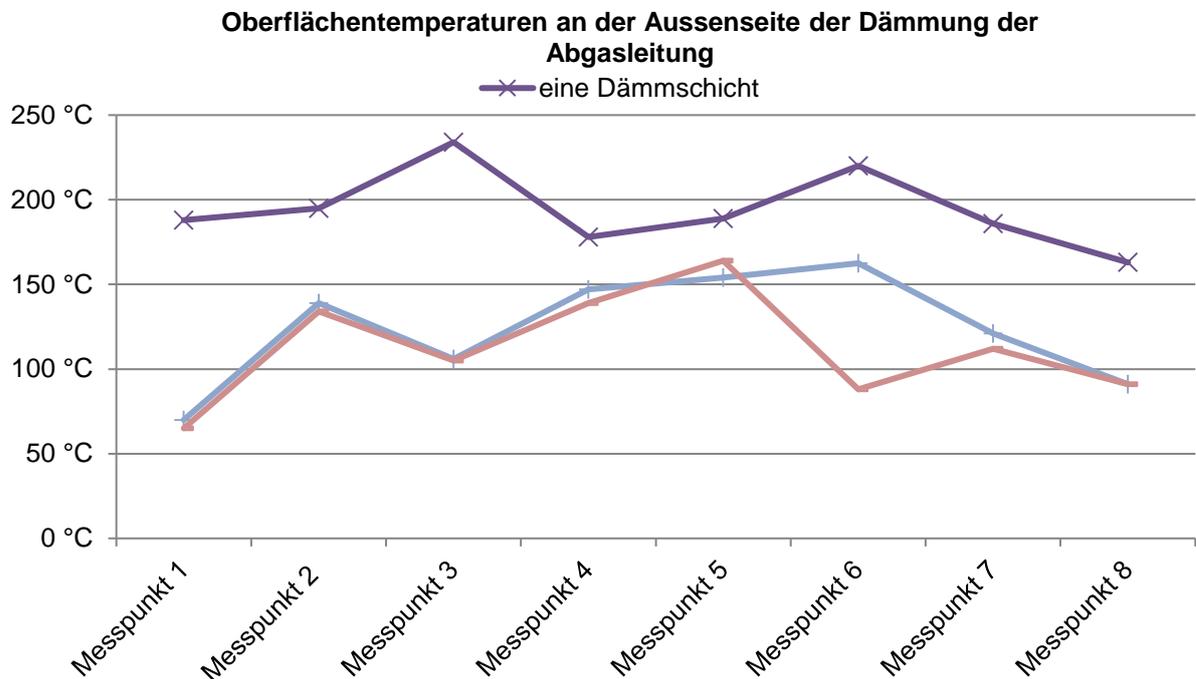


Abb. 28: Repräsentative Oberflächentemperaturen bei unterschiedlicher Dämmung des Abgastrakts PT2.
(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

Neben der Untersuchung und Optimierung der thermischen Verluste der Hauptkomponenten ist für den autonomen Betrieb PT2 und PT5 eine Verkleidung (Kapselung) konzipiert worden, welche die Schallemissionen des WKK-Systems im Aufstellraum reduzieren, die Sicherheit im autonomen Betrieb erhöhen und eine Präsentation repräsentativer Demonstrationsanlagen ermöglichen soll. Die ersten Versuche mit Verkleidung (Messpunkte Abb. 29 und Abb. 31) haben verdeutlicht, dass bei vollständiger Kapselung die Innentemperatur im WKK-System deutlich ansteigt (Abb. 30 und Abb. 32). Deshalb sind die Innenraumtemperaturen im Juni und Juli 2017 bei Hoval untersucht worden. Die dabei erreichten Temperaturen haben negative Auswirkungen auf Elektronikbauteile, Schläuche, Dämmmaterialien, etc. und beeinflussen einen sicheren autonomen Betrieb negativ. Die Metallverkleidung ist ursprünglich auf der Innenseite mit Schalldämmmatten aus dem Wärmepumpenbereich ausgerüstet worden. Trotz der drei Wärmedämmschichten, ist die Kontakttemperatur zwischen Abgastrakt und dem Schalldämmmaterial zu hoch. Ein teilweises Abschmelzen der Oberfläche der Schalldämmmatten ist die Folge gewesen. Deshalb sind andere geeignete Dämmmaterialien ausgesucht und an solchen kritischen Stellen eingesetzt worden. Nach Aufbringung der dritten Dämmschicht des Abgastrakts vielen mehrfach in der Dämmschicht liegenden Lambdasonden aus, bzw. sind die daran angeschlossenen Kabel geschmolzen. Deshalb sind zusätzliche Versuche mit einem externen Gebläse zur Senkung der zu hohen Innenraumtemperaturen mittels Luftkühlung durchgeführt worden. Die Untersuchungen wurden am 13.07.2017 aufgrund des mittlerweile zu geringen Ventilspiels an PT2 unterbrochen.

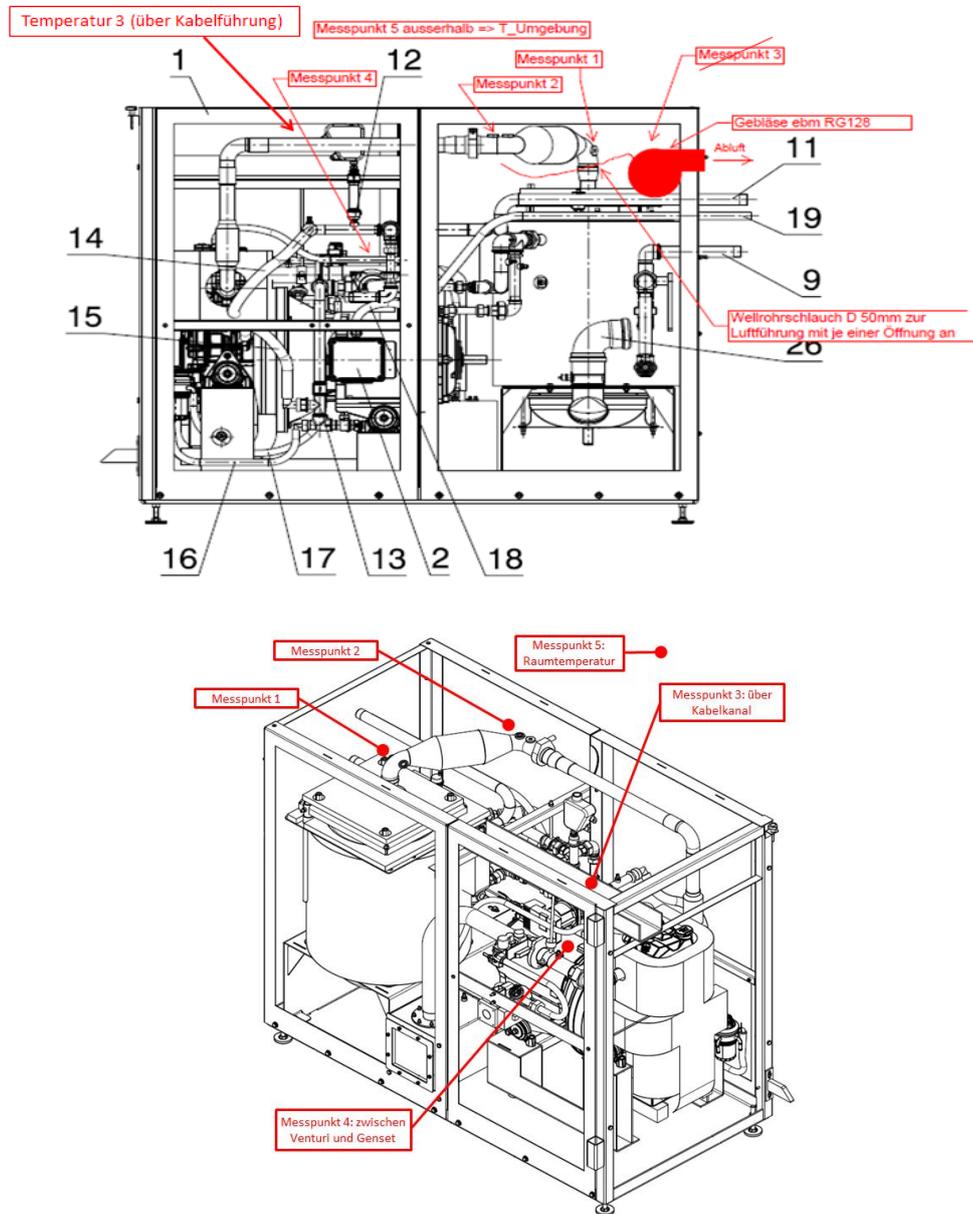


Abb. 29: Versuch vom 10.07.2017 Messstellen zur Erhebung der Innenraumtemperaturen des vollständig gekapselten PT2. Zugehörigen Temperaturverlauf siehe Abb. 30.
(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

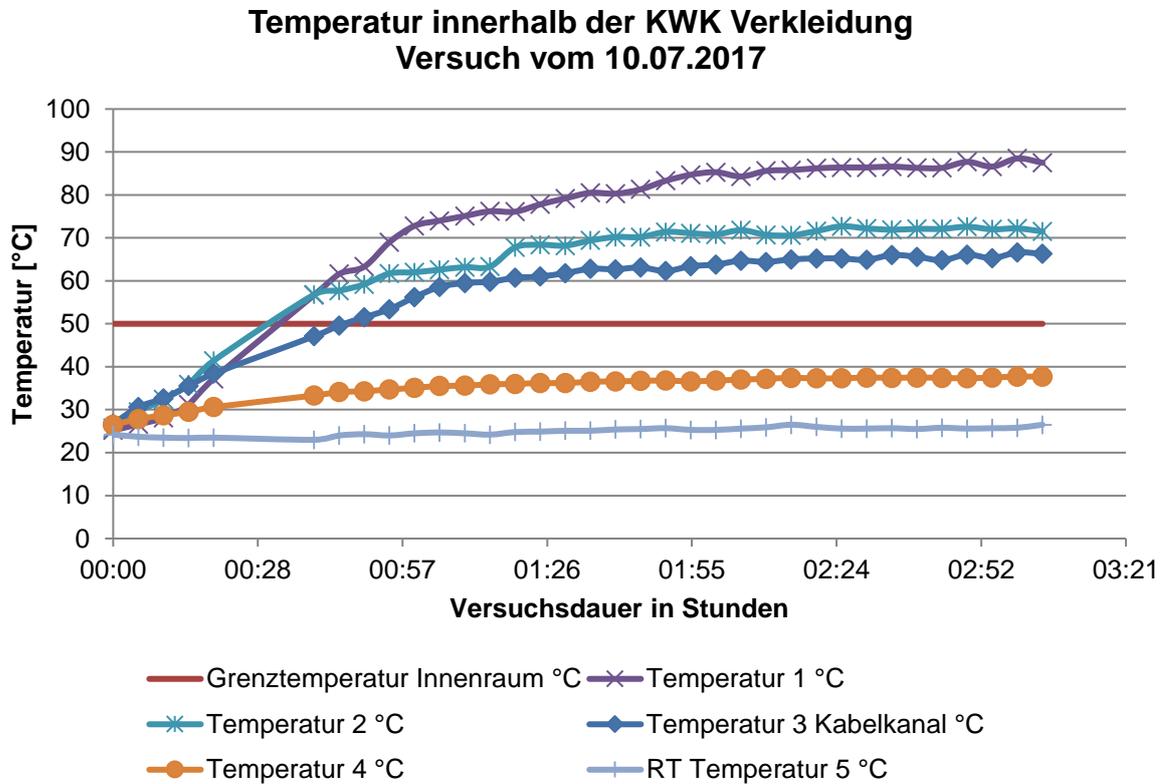


Abb. 30: Versuch vom 10.07.2017 Innenraumtemperaturen des vollständig gekapselten PT2. Zugehörige Messstellenpositionen siehe Abb. 29. (Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

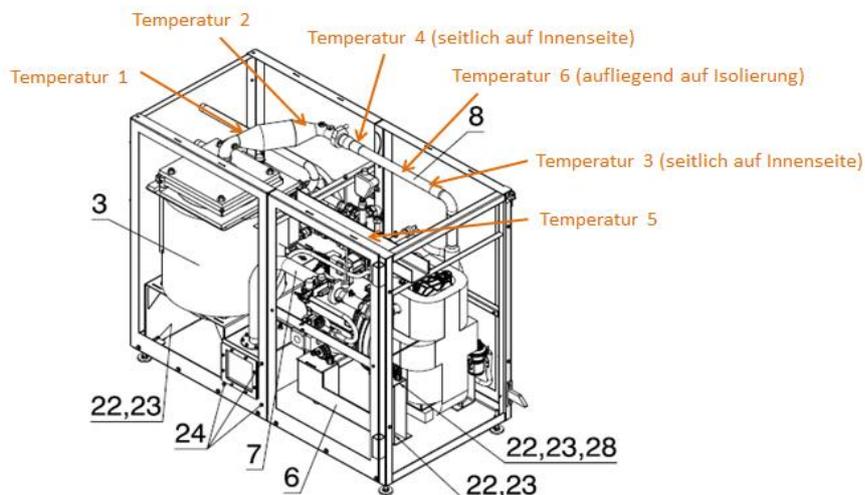


Abb. 31: Versuch vom 12.07.2017 Messstellen zur Erhebung der Innenraumtemperaturen des vollständig gekapselten PT2. Zugehöriger Temperaturverlauf siehe Abb. 32. (Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

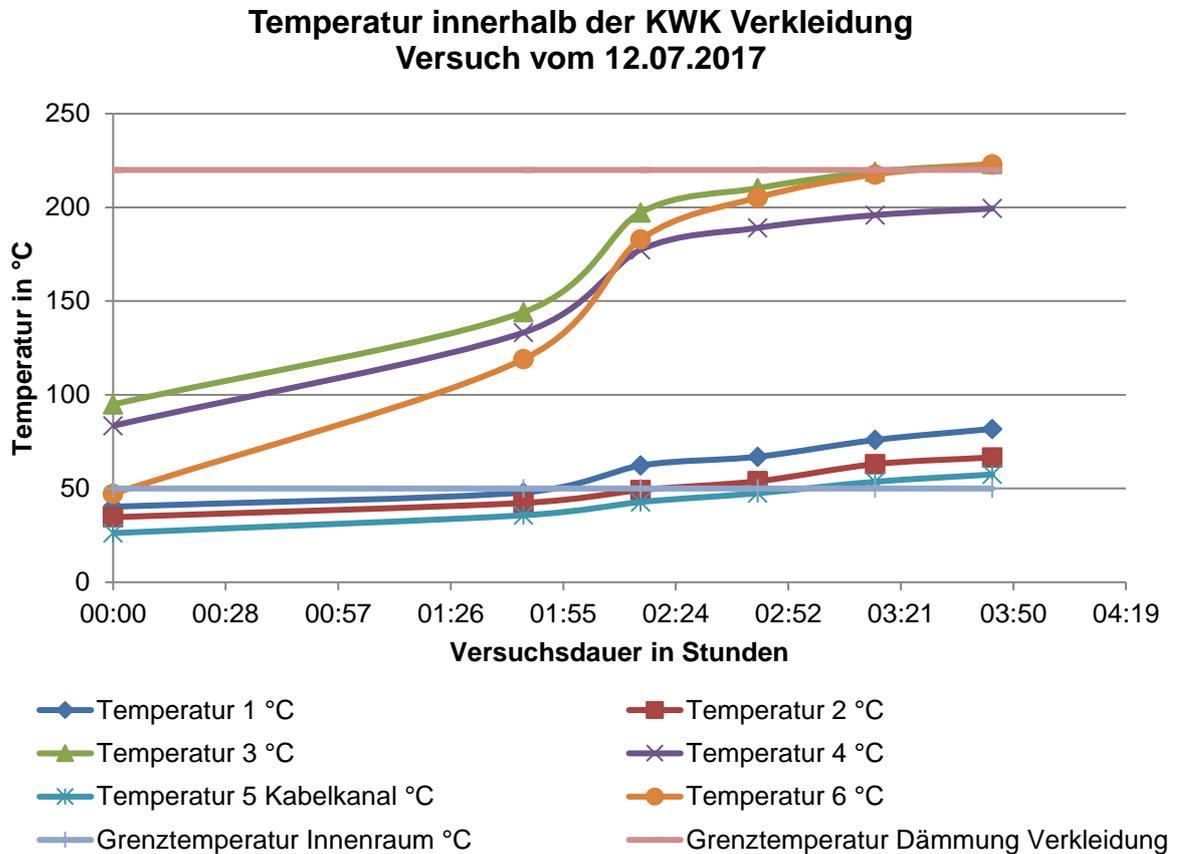


Abb. 32: Versuch vom 12.07.2017 Innenraumtemperaturen des vollständig gekapselten PT2.
Zugehörige Messstellenpositionen siehe Abb. 31.
(Quelle: Hoval Aktiengesellschaft)

Untersuchung der Schallemissionen der Gesamtanlage

(Hoval Aktiengesellschaft)

Die Endkunden- und Behördenakzeptanz eines WKK Systems – sowie anderer Energie- bzw. genauer Heizsysteme z.B. Wärmepumpen – hängen wesentlich davon ab, ob der Nutzer bzw. seine Umgebung von den entsprechenden Systemen nicht bzw. möglichst wenig negativ beeinflusst oder gestört werden. Sämtliche europäischen Gesetzgeber tragen dem auch mit entsprechenden Grenzwerten im Rahmen der Emissions- und Immissionsregelungen Sorge. Ein wesentlicher Teil dieser Regelwerke mit den vorgeschriebenen Grenzwerten zielt auf Schallspitzen oder Dauerschallereignisse ab.

Die Motor- und Systemoptimierungen der Projekte „Aladin I“ und „Aladin II“ zielen auf eine Wirkungsgradsteigerung und eine Reduktion der CO₂- bzw. NO_x-Emissionen des Abgases im stationären Betrieb und bei Kaltstarts ab. Konzeptionelle, konstruktive oder steuerungstechnische Primärmaßnahmen am Motor zur Reduktion der Schallemissionen sind im Rahmen der Projekte „Aladin I“ und „Aladin II“ vorerst nicht berücksichtigt worden. Somit sind nur mehr nachträgliche Sekundärmaßnahmen möglich gewesen, wofür Messdaten als Entscheidungs- und Auslegungsgrundlagen benötigt worden sind.



Vorerst sind Messungen im Abgasrohr und um die WKK Anlage zur Einschätzung der Schallemission im Aufstellraum durchgeführt worden. Die Messungen im Abgasrohr (Abb. 33) sollen zu einem späteren Zeitpunkt die Auswahl passender Abgasschalldämpfer ermöglichen. Für die Inbetriebnahmeversuche bei Hoval sind vorerst Abgasschalldämpfer von Öl- bzw. Gasheizkesseln in die Abgasleitung integriert worden. Diese Elemente sind allerdings nicht für die WKK Anlage ausgelegt und sollen für den Dauerbetrieb ersetzt werden.

Die Schallemissionen der WKK-Anlage ohne Verkleidung (PT1, PT3, PT4) im Aufstellraum sind ebenfalls gemessen worden (Abb. 34). Die Werte hätten später mit den Schallemissionen der WKK Anlagen mit Verkleidung (PT2, PT5) verglichen werden sollen, um den Dämpfungsgrad der Verkleidung quantifizieren zu können. Mit Verkleidung ist keine Schallmessungen mehr möglich gewesen, da die hohen Innenraumtemperaturen nicht mehr gelöst werden konnten. Bei Betrieb mit Verkleidung deutet allerdings der individuelle Höreindruck darauf hin, dass das Ansaugeräusch im aktuellen Setting den grössten Anteil an den Schallemissionen haben sollte. Die Ansaugbox ist 2017 von Hoval ausserhalb der Kapselung mit einem einfachen Ansaugluftschalldämpfer ergänzt worden, aber diese Massnahme zeigte vorerst keine bedeutende Wirkung.

2018 hat der Motorhersteller serienmässige Ansaugkästen vergleichbarer Motoren zur Verfügung stellen können. sa-charging solutions hat damit im Rahmen eines einfachen Vergleichs der Schalldruckpegel direkt neben dem Ansaugkasten (PT3 bzw. PT4) eine Reduktion von ca. 12 dB an einem ungekapseltem WKK-System ermitteln können. Dieser Ansatz ist bei etwaigen weiteren Arbeiten an dem System unbedingt weiterzuverfolgen.

Schalleistung im Abgasrohr am KWK-Austritt ALADIN II

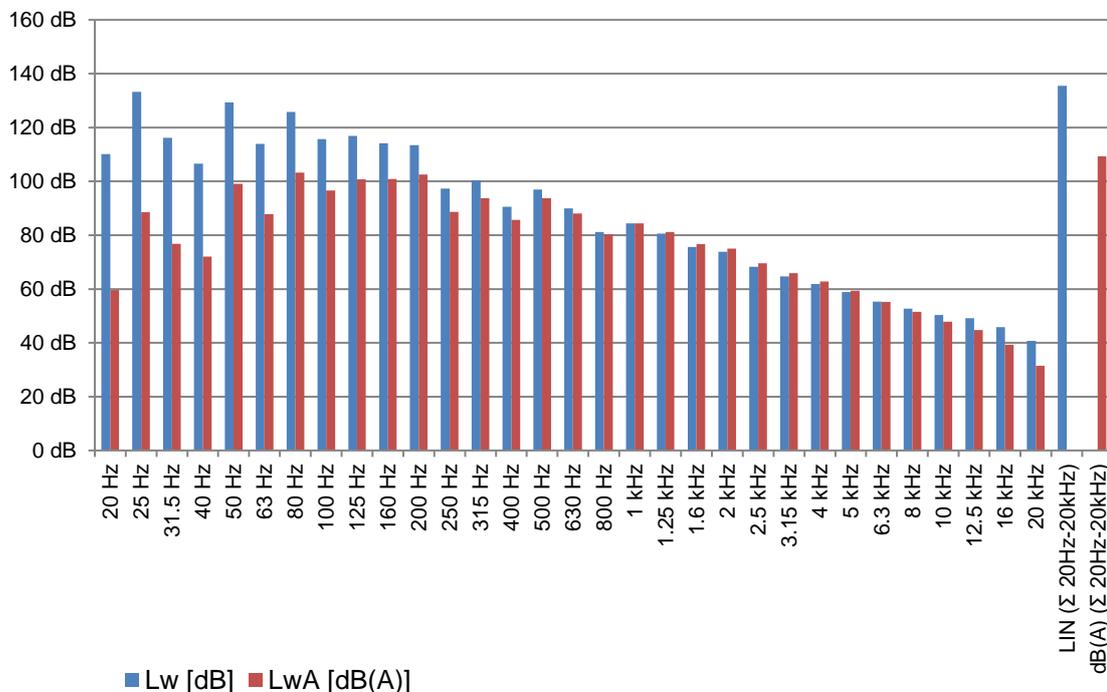


Abb. 33: Auswertung der Schalleistung des Geräusches im Abgasrohr

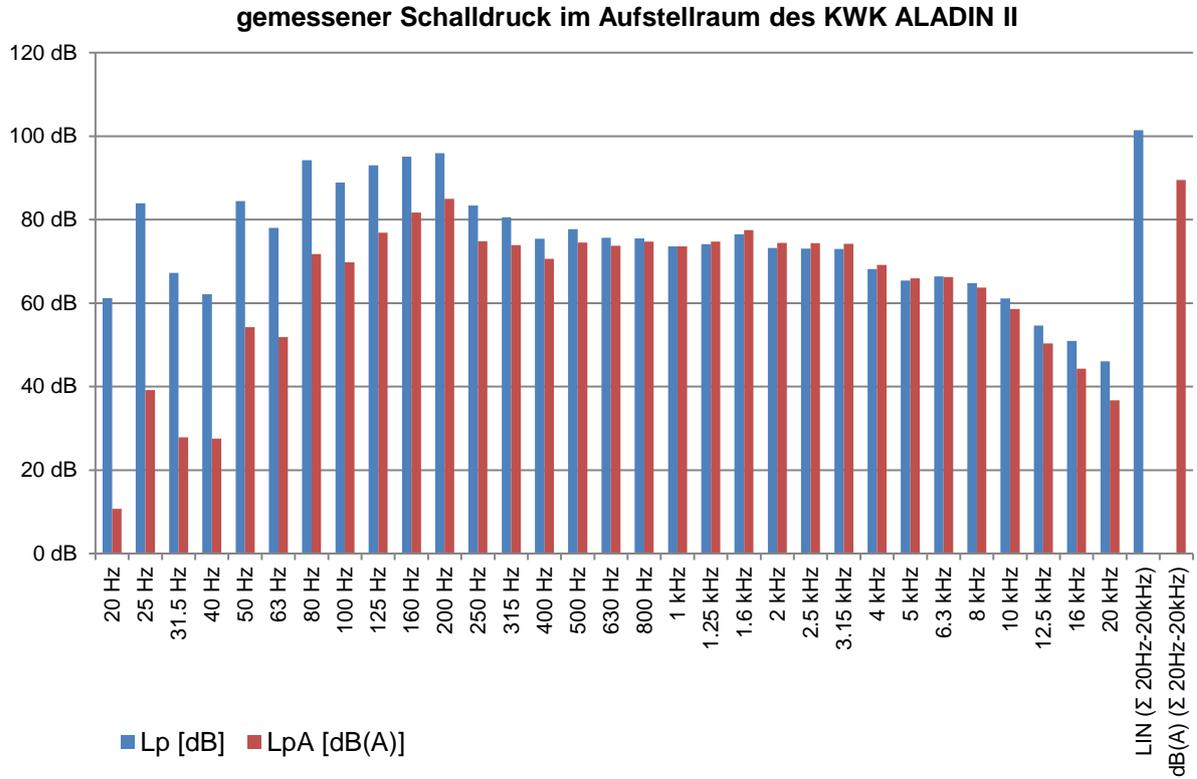


Abb. 34: Schalldruck Summenpegel rund um die WKK-Anlage im Aufstellraum



Ausblick

Zukünftige Weiterentwicklung des Anlagenaufbaus und die Weiterverwendung der fünf Anlagen

(LAV,ETHZ)

Die Länge des Abgastrakts und die entsprechende Geometrie sind mit dem erzielten Wissen aus dem Projekt neu zu evaluieren und dahingehend anzupassen, dass die Wärmeverluste minimal und das Packaging optimal werden. Dies hilft auch den Wärmehaushalt im Gehäuseinnern besser in den Griff zu bekommen. Mit einer anschliessenden Optimierung der Ventilsteuerzeiten können durch Anpassungen des Abgastraktes hervorgerufene allfällige Einbussen im Wirkungsgrad weitestgehend, wenn nicht sogar vollständig kompensiert werden. Unter Umständen wird dies die Zylinderfüllung und somit den Kraftstoffverbrauch sowie die elektrische Leistung etwas vermindern. Dies wäre jedoch eine Einbusse, die absolut verkraftbar ist, da die Effizienz und nicht die absolute Leistung hinsichtlich Energiestrategie 2050 im Vordergrund steht. Dass sich am Generator oder Motor selber etwas ändert ist unwahrscheinlich und würde nur passieren, wenn grundlegende technische Mängel an einem der Aggregate festgestellt werden würde.

Die Thermische Leistung und damit direkt verbunden der thermische und der totale Wirkungsgrad, müssen in einer Überarbeitung des Systems massiv verbessert werden damit die Anlage konkurrenzfähig wird. Aktuell verliert das System noch zu viel Wärme, v.a. über den derzeit noch zu langen Abgastrakt. Zudem ist auch die Abgastraktisolation noch nicht effektiv genug und muss wie in Kapitel „Isolation Abgastrakt“ beschrieben überarbeitet werden.

Nach Abschluss des Projektes wurden die Anlagen PT2-5 komplett funktionsfähig mit revidierten oder nur wenige Stunden betriebenen Motoren bei der Bucher AG in Langenthal eingelagert und stehen den beiden ETH Institutionen IDSC und LAV zur weiteren Verwendung zur Verfügung. PT1 verbleibt an der ETH. Für die Forschung im Rahmen einer Dissertation am IDSC wird PT4 an der ETH installiert. Am LAV läuft derzeit ein P&D Projekt (ReMaP, Task 3.5), für welches die Anlagen PT3 verwendet wird. Im Rahmen dieses Projektes wird diese Anlage mit einem Dampf-Methan-Reformerprozess erweitert und bis Ende 2020 im Labor des LAV betrieben werden.

Zukünftige Weiterentwicklung der BHKW Steuerung und Regelung

(IDSC,ETHZ)

In Bezug auf den steuerungs- und regelungstechnischen Teil der BHKW Anlage sind insbesondere die Ergebnisse des parallelen Forschungs- und Entwicklungsprojekts [2] sehr positiv zu bewerten. Mit dem zu einem frühen Zeitpunkt des Projekts gesetzten Fokus einer möglichen Weiterentwicklung in Richtung Serienproduktion wurde zudem sowohl beim hardware- als auch beim softwaretechnischen Aufbau auf Kosteneffizienz und spätere Anwendungseinbettungen geachtet. Dennoch ergeben sich aus der Anwendung in einem Forschungskontext mehrere Ansatzpunkte, die im Rahmen einer Weiterentwicklung zu berücksichtigen sind.

Den grössten Ansatzpunkt stellt in diesem Zusammenhang der steuerungstechnische Aufbau der Anlage dar. Der Schaltkasten wurde auf Vorlage des Vorgängerprojekts geplant und umgesetzt. Die vorgenommenen Veränderungen waren nicht grundsätzlicher Natur, sondern haben sich auf die Anpas-



sung an die geänderten Sensoren/Aktuatoren beschränkt. Aufgrund des Einsatzes in einem Forschungskontext wurde ebenfalls auf den Einsatz einer dedizierten speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) verzichtet und die Sicherheit der Anlage durch ein massgeschneidertes Sicherheitskonzept sichergestellt. In einer möglichen Serienanwendung ist eine SPS jedoch Industriestandard und zwingend extern einzukaufen oder zu entwickeln. Dies resultiert in einer notwendigen Neuplanung des Schaltkastens unter Berücksichtigung der verwendeten Hardware (Sensoren, Aktuatoren). Nach derzeitigem Stand ist ein vollständiges Ersetzen jedoch nicht notwendig, da bei der Auswahl der Hardware insgesamt auf grösstmögliche Kosteneffizienz geachtet wurde. Zu Forschungszwecken wurden jedoch eine Vielzahl an Temperatursensoren und Volumenstrommessern integriert, deren Einsatz in einer Serienanwendung nicht notwendig ist. Eine mögliche Kostenreduktion ergibt sich somit aus der Reduktion des sensorischen Aufbaues, der Einbindung einer kommerziellen SPS und der daraus resultierenden Neuplanung des Schaltkastens (Aufbau und Materialien).

Durch die Notwendigkeit einer SPS kann das softwaretechnische Sicherheitskonzept deutlich reduziert werden. Für jeden Fehlerfall muss dabei individuell geprüft werden, ob eine Überwachung über die SPS stattfinden soll oder weiterhin eine Überprüfung auf dem Steuergerät erfolgt. Die extern angebundene Prüfstandssteuerung ist einzig im Kontext des vorliegenden Projekts von Relevanz gewesen und kann daher zukünftig über eine entsprechende Bedienoberfläche am Blockheizkraftwerk realisiert werden. Die Datensicherung und der Fernwartungszugriff sind ebenfalls Industriestandard und werden üblicherweise über die Netzwerkanbindung der SPS bzw. des zugehörigen Betriebsmonitors realisiert. Eine zu realisierende webbasierte Oberfläche, wie sie in heutigen Heizungsanwendungen üblich ist, erlaubt eine entsprechende Übersicht der Prozessparameter. Mit diesen Entwicklungsschritten können sämtliche Funktionen der aktuellen Betriebssteuerung in den Kontext einer Serienanwendung überführt werden.

Unter regelungstechnischen Gesichtspunkten sind voraussichtlich nur geringe Änderungen vorzunehmen. Die im Rahmen des Projekts realisierten Algorithmen sind theoretisch auf sämtlichen Steuergeräten implementierbar. Bei einem Wechsel des Steuergeräteherstellers oder bei einer eigenständigen Realisierung ist die Kompatibilität der bestehenden Software zu prüfen und gegebenenfalls anzupassen. Da auch bei der Auswahl des Steuergeräts auf eine hohe Kosteneffizienz geachtet wurde, ist ein Wechsel des Herstellers auch für eine Serienanwendung nicht notwendig. Sollten dennoch zukünftig Eigenentwicklungen präferiert werden, dann können die Regelalgorithmen mit geringem Aufwand portiert werden, da diese aus eben jenem Grund mit Standardmethoden realisiert wurden und auf den Einsatz moderner Regelmethode, die unter Umständen besondere Anforderungen an das Steuergerät stellen, verzichtet wurde.

Eine zukünftige, mögliche Weiterentwicklung der Regelalgorithmen stellt die Einbettung von Wetterdaten dar. Durch diese Information kann der bedarfsgerechte Betrieb des Blockheizkraftwerks weiter optimiert werden. Ferner können Sekundärsysteme, wie beispielsweise eine Wärmepumpe oder eine Solaranlage, zur Effizienzsteigerung oder zur Betriebsoptimierung, beispielsweise im Sommer, wenn kein hoher Wärmebedarf vorliegt, angebunden werden. Dies erfordert nur geringfügige Änderungen an der Betriebssteuerung, da die entsprechenden Schnittstellen bereits implementiert wurden.

Optimierung des Wärmehaushalts und der Schallemissionen

(Hoval Aktiengesellschaft)

Auf Grund des derzeitigen Konzepts der Abgasführung in einem ungekühlte Abgastrakt sind die direkt mit dem Abgas in Berührung stehenden Komponenten (z. B. Abgasrohre, Flexrohre, Dämmung etc.) starken Temperaturbelastungen ausgesetzt, welche die Standfestigkeiten der Materialien deutlich reduzieren und zu sicherheitstechnischen Herausforderungen führen. Beispiele dafür sind die im Kapitel



„Isolation Abgastrakt“ beschriebene „Auflösung“ des ersten Wärmedämmmaterials (Klassifizierungstemperatur 1250°C; bekannte praktische Anwendungen in der Heiztechnik bis 1000°C) (siehe Abb. 19), oder die schnelle Temperaturkorrosion eines der Flexrohre (siehe Abb. 18) bei ca. 700 bis 750°C heißen Abgasen.

Neben der direkten Temperaturbelastung kommt die unmittelbare Temperaturbelastung der im Nahfeld bzw. der im Innenraum der gekapselten Einheit liegenden Bauteile wie Elektro- und Elektronikkomponenten, mechanischer Schwingungsdämpfer, thermischer Dämmungen (siehe Abb. 30 und Abb. 32). Beispiele für die Auswirkungen sind schmelzende Isolierungen der Lambdasonden, welche zu Signalausfällen führen, oder das Überschreiten der Zielgrenztemperatur von 50°C, welche für die meisten Elektronikkomponenten als maximale Umgebungstemperatur angesetzt wird, im Innenraum der gekapselten Einheiten (siehe Abb. 30).

Eine mögliche Weiterentwicklung des Gesamtsystems und die dafür notwendige Reduktion der thermischen Belastung aller Bauteile impliziert somit vor der Weiterentwicklung der bereits bisher getroffener Sekundärmaßnahmen zur Wärmedämmung zukünftige Primärmaßnahmen zur Kühlung – vor allem Flüssigkeitskühlung – der am stärksten thermisch belasteten Bauteile, wie z. B. dem Abgastrakt, und einer Einbindung dieses Kühlenergieflusses in das Wärmemanagement des Gesamtsystems. Derartige konstruktive Eingriffe würden in weiterer Folge in jedem Fall auch Anpassungen des Systems und des Regelungskonzeptes bedingen.

Eine Optimierung des Wärmehaushalts hin zu einem verbesserten thermischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems würde auch eine grundlegendere und detailliertere Analyse und Charakterisierung der hydraulischen und wärmetechnischen Eigenschaften der Einzelkomponenten wie Verbrennungsmotor, elektrischer Generator, etc. bedingen. Im Rahmen der notwendigen thermischen Optimierung, ist auch eine Weiterentwicklung der motorinternen Führung der Kühlflüssigkeit und Wärmeübertragungsflächen nicht auszuschließen.

Der zuletzt vom Motorhersteller zur Verfügung gestellte Ansaugkasten (siehe Abb. 22) scheint in ersten Schnellmessungen ein vielversprechender Ansatz zu sein. Sollten weitere Massnahmen getroffen werden, wäre vorher eine normgerechte und vergleichbare Schallmessung der Schalleistung am Gesamtsystem vorzunehmen. Damit wäre eine Quantifizierung des Anteils des Luftansauggeräuschs am Gesamtschallpegel und eine mögliche Schallpegelreduktion am Gesamtsystem auf Grund des Originalansaugkastens möglich.

Auch auf der Abgasseite besteht dringender Handlungsbedarf zur Reduktion der Schallemissionen. In einem ersten Schritt sollten zum Motor passende Abgasschalldämpfer aus der Motorserie erprobt, eingebaut und schalltechnisch vermessen werden. Je nach dem wo im System derartige Abgasschalldämpfer positioniert werden, könnten wassergekühlte Ausführungen notwendig werden. Zudem wird an stationären BHKW Anlagen stärker Wert auf die Reduktion tiefer Frequenzbänder gelegt, welche in der Regel mit zusätzlichen speziell ausgelegten Abgasschalldämpfern realisiert wird. Hier wäre eine Auslegung erst möglich, wenn das Motorkonzept und die Betriebspunkte endgültig fixiert werden.

Die verbleibenden Geräusche könnten gegebenenfalls mit einer neu zu konzipierenden (luftdichten) Kapselung des Gesamtsystems weiter reduziert werden. Hierzu müsste aber vorab das Wärmemanagement entsprechend optimiert und die thermischen Verluste des Motors, Abgastrakt etc. deutlich reduziert werden.



Mechanische Schwingungen sind eng mit dem Thema Schall verknüpft - Stichwort Körperschall. Diese mechanischen Schwingungen müssten vor einer seriennahen Entwicklung grundlegende analysiert werden, um eine fachgerechte Dimensionierung und Auswahl entsprechender Lagerkonzepte, mechanischer Schwingungsdämpfer und langzeitbeständiger flexibler Anschlüsse des Abgastrakts, des Ansaugtrakts, der Hydraulik (bei minimierter Sauerstoffdiffusion), etc. zu ermöglichen. Z. B. scheint sich bei einer Anlage die Schraubenverbindung des Abgastrakts hin zum Abgaswärmeübertrager auf Grund der Schwingungsübertragung gelöst zu haben, obwohl der Abgastrakt mit einem Flexrohr schwingungsentkoppelt gewesen sein sollte (siehe Abb. 17).

Qualitative Kostenabschätzung einer serienmässig produzierten Aladin II Anlage

(LAV, ETHZ)

Eine genaue Kostenschätzung eines Marktpreises ist im aktuellen Stadium aufwändig und schwierig, da die Entwicklung noch nicht dem Stand einer Serienproduktion entspricht. Für die folgenden Betrachtungen gehen die Autoren deshalb davon aus, dass die Anlage mit Ausnahme der spezifisch erwähnten Komponenten ungefähr gleich viel kostet, wie andere am Markt verfügbare Anlagen (siehe Tabelle 5). Daraus ergibt sich ein Basispreis von 22'000 EUR (Mittelwert der verfügbaren Daten aus Tabelle 5). Qualitative Abweichungen vom Basispreis anhand der einzelnen spezifisch erwähnten Bestandteilen werden im Folgenden diskutiert.

Die Aladin II Anlage unterscheidet sich v.a. durch den Abgaswärmetauscher, den Motor und dessen Anbindung an den Generator sowie den Generator selber von anderen mBHKW's.

- Der Abgaswärmetauscher ist ein Serienprodukt von Hoval und wird sicher teurer (da aufwändiger gebaut) sein als die Komponenten in am Markt verfügbaren Anlagen. Durch seine spezielle Bauweise ist es jedoch möglich den thermischen Wirkungsgrad soweit zu steigern, dass sich dadurch ein Vorteil auf dem Markt erringen lässt.
- Der Motor ist ein Serienprodukt von Swissauto Powersport LLC und muss für die Anwendung im Aladin II BHKW leicht abgeändert werden (andere Ventile, Ventilsitzringe und Nockenwellen). Dies wird nicht grundsätzlich zu einer Preissteigerung führen, da für die nötigen Änderungen der Produktionsprozess leicht angepasst werden kann.
- Die Ankopplung von Motor an den Generator ist derzeit als steife Verbindung mit Wellenspiel in axialer Richtung ausgeführt. Dies bedingt genau gefertigte und grosse und dadurch teure Schwungradabdeckungen sowie eine in der Herstellung ebenfalls teure Keilverzahnung der Motor- und Generatorwelle (in der Einzelstückfertigung derzeit total 2266.- CHF/Anlage, exkl. MWST). Um konkurrenzfähig zu bleiben müsste hier wohl eine günstigere Konstruktion gemacht werden, welche eine flexible Kupplung vorsieht. Dies hätte auch den Vorteil, dass dadurch die Wartungsarbeiten am Motor vereinfacht würden respektive der Motor alleine ausgetauscht werden könnte, ohne den Generator ausbauen zu müssen.
- Der Generator ist im Unterschied zu gewissen anderen BHKWS wassergekühlt, was ihn etwas teurer macht aber dadurch auch zur hohen elektrischen und thermischen Effizienz der Anlage beiträgt. Bei der Beschaffung hat EMWB damals eine Offerte für die benötigten 5 Stück (6550.- CHF/Stk., exkl. MWST) und eine solche für eine Serienproduktion über 50 Stück (3794.- CHF/Stk., exkl. MWST) gemacht.



Abschliessend kann festgehalten werden, dass die Aladin II Anlage nicht in ihrer derzeitigen Ausführung in Serienproduktion gehen kann, da sie dadurch zu teuer wäre. Auf den Abgaswärmetauscher und den Generator sollte aus Effizienzgründen nicht verzichtet werden. Der Generator würde in Serienproduktion rund 40% günstiger. Die Motor-Generatorkopplung muss günstiger gemacht werden. Netto wird jedoch qualitativ erwartet, dass die Aladin II Anlage etwas teurer sein wird, als die Konkurrenzprodukte auf dem Markt. Die übriggebliebene Preissteigerung geht aber direkt mit einer elektrischen und thermischen Effizienzsteigerung einher.



Diskussion

(LAV,ETHZ)

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass bei der Weiterentwicklung der Aladin II Anlage noch verschiedene technische Herausforderungen gemeistert werden müssen, bis diese marktreif ist. Auch die Frage der Herstellungskosten ist zum jetzigen Zeitpunkt noch schwierig zu beantworten. Auf dem Weg zur Marktreife werden sich einige Leistungs- und andere Eckdaten zwar noch verändern. Nichts desto trotz kann das technische Potential der Anlage bereits abgeschätzt und mit dem Stand der Technik auf dem Markt verglichen werden. Tabelle 5 zeigt einen Überblick einiger der effizientesten auf dem Markt verfügbaren, gasbetriebenen Blockheizkraftwerke in derselben Leistungsklasse und vergleicht sie mit jenen der Aladin II PT1 Anlage, an der die Abgastraktisolation noch nicht jener von PT3 und 4 entspricht, wie sie in im Kapitel „Isolation Abgastrakt“ beschrieben ist. Die Liste wurde anhand der Förderliste des deutschen Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle erstellt [3]. Es sind nur Blockheizkraftwerke gelistet, die einen hohen Bonus bei der Förderung erzielen, was als Mass für eine hohe Effizienz betrachtet werden kann.

Bezüglich des elektrischen Wirkungsgrades positioniert sich das Aladin II mBHKW an der Spitze. Diese Kennzahl wird sich bis zu einer potentiellen Markteinführung nur noch verändern, wenn am Motor respektive am Verbrennungsprozess oder am Generator etwas verändert wird. Der thermische Wirkungsgrad wird sich mit einer Verkürzung und einer besseren Isolation des Abgastraktes noch massiv verbessern lassen.

Aus Tabelle 5 ist zudem ersichtlich, dass die Schadstoffemissionen des Aladin II mBHKW im Stationärbetrieb im Vergleich zu bereits am Markt befindlichen Produkten sehr niedrig sind. Während einige Hersteller für ihre Produkte einzig angeben unter den gesetzlichen Limiten zu bleiben, demonstrieren andere Hersteller eine weiterführende Reduktion der Emissionen. Besonders im Vergleich mit diesen Produkten zeigt sich, dass das Aladin II mBHKW nicht nur strategisch auf einen Schadstoff fokussiert ist, wie es beispielsweise beim Senertec Dachs und Kohlenmonoxid zu erkennen ist, sondern alle drei betrachteten Schadstoffkomponenten im Abgas gleichermaßen reduziert werden. Betrachtet man die niedrigeren Grenzwerte für Stickoxide von 50 mg/m^3 in ausgewählten Städten der Schweiz [4], beispielsweise Zürich und Basel, dann dürften von den in Tabelle 5 gelisteten mBHKW neben dem Aladin II einzig das ETZ Muscetier NG10 und das Vaillant Ecopower 4.7 in diesen Städten neu aufgestellt werden. Im Gegensatz zum Aladin II gehen die niedrigen Stickoxidemissionen bei den beiden letztgenannten Blockheizkraftwerken jedoch zu Lasten von erhöhten Kohlenmonoxid-Emissionen, die nur geringfügig unter der industrieweit anerkannten Schwelle von $\frac{1}{2}$ TA-Luft (150 mg/m^3) bleiben. Ferner sind die Schadstoffemissionen des Aladin II mBHKW zukunftsicher, da bereits im derzeitigen Stand zukünftige Anforderungen, beispielsweise die Novellierung der TA Luft unter Einbeziehung der unverbrannten Kohlenwasserstoffe, um mehr als 50% unterschritten werden [5]. Die im Rahmen des parallellaufenden F&E Projektes [2] entwickelte Emissionsminimierung während des Kaltstarts wird zusätzlich einen entscheidenden Vorteil auf dem Markt bringen, insbesondere wenn das Gerät zur Netzstabilisierung eingesetzt wird. In Abb. 35 sind die Resultate dieser Entwicklung dargestellt. Im Referenzfall (**Ref**) wird keine der folgenden Strategien angewandt:

AFR: Das Luft-zu-Brennstoff Verhältnis (engl. Air-to-fuel-ratio, AFR) wird während dem Kaltstart gegenüber dem Stationärbetrieb angepasst um einen schnelleren Rückgang der NO_x und HC Emissionen zu erreichen.



SA: Der Zündzeitpunkt (engl. spark angle / spark advance) wird während dem Kaltstart Richtung OT verschoben um höhere Abgastemperaturen und damit ein schnelleres aufheizen des Katalysators zu erreichen. Zudem nimmt dadurch die Verbrennungsspitzentemperatur und damit die NO_x-Bildung ab.

EHC: Ein elektrisch beheizbarer Katalysator (engl.: electrically heated catalyst) kann unabhängig der Strategie zugeschaltet werden, wodurch die Umsetzung der Schadstoffe in einem Kaltstart früher beginnt.

Die Minimierung von Kaltstartemissionen wird im Rahmen der Massnahmen zur Umsetzung der Energiestrategie 2050 vermehrt ein Anwendungsfeld werden, da mit einem grösseren Anteil an erneuerbaren Energiequellen die Vorhersehbarkeit der Stromproduktion sinken wird.

Hinsichtlich einer Serienproduktion der Anlage rechtfertigt die gesteigerte thermische und elektrische Effizienz einen qualitativen Preisanstieg gegenüber den Konkurrenzprodukten. Die Strategien AFR und SA zur Minimierung der Kaltstartemissionen sind mit keinerlei Kostensteigerung verbunden, da diese rein softwarebasiert implementiert werden können und keine zusätzliche Hardware nötig ist. Der geringe Schadstoffausstoss – v.a. während des Kaltstartes – kann jedoch künftig ein Verkaufsargument werden. Die Wartungskosten der Aladin-II-Anlage wird sich von den am Markt verfügbaren Anlagen v.a. wegen des eingesetzten Motors unterscheiden. Da der verbaute Motor aus dem Sport- und Freizeitbereich stammt ist grundsätzlich mit einer tieferen Standzeit zu rechnen als bei anderen BHKW's. Dies wird die Wartungskosten erhöhen. Mit einer geeigneten Konstruktion für einen einfachen Motortausch an der Anlage können die Wartungskosten etwas optimiert werden, da dann die Wartung der Motoren zentral stattfinden kann und der BHKW Betreiber keine langen Unterbrüche in Kauf nehmen muss.

Abschliessend kann der Aladin-II-Anlage unter Vorbehalt der noch durchzuführenden Verbesserungen eine hohe technische und potentiell auch kommerzielle Konkurrenzfähigkeit mit den derzeit auf dem Markt befindlichen Produkten attestiert werden. Hinsichtlich einer sich künftig stark wandelnden Zusammensetzung der Energieproduktion, wird der Bedarf an hocheffizienten und emissionsarmen Stromproduktionsanlagen mit kurzen Anlaufzeiten tendenziell zunehmen. Eine Weiterentwicklung der Anlage zur Serienreife wird unter diesen Gesichtspunkten als durchaus sinnvoll erachtet.



Modell / Hersteller	Preis ³ [€]	Motor			Pel [kW]	Pth [kW]	Wirkungsgrade [%]			Emissionen [mg/m ³] bei 5% O ₂		
		Zylinder [-]	Hubraum [cm ³]	Drehzahl [min ⁻¹]			elektrisch	thermisch	gesamt	CO	HC	NOx
Aladin II	k.A.	1	325	3000	7.5	13.1 ¹ / 17.3 ^{1,2}	32.0	56 ¹ / 74 ^{1,2}	88 ¹ / 106 ^{1,2}	30.5	2.1	12.5
neoTower 7.2 / RMB Energie GmbH	k.A.	3	1000	1550	7.2	18.1 ¹	31.2	78.3 ¹	109.5 ¹	k.A.	k.A.	k.A.
Smartblock 7.5 / KW-Energie	25.400,00	3	972	1500	7.5	22.9 ¹	26.8	81.8 ¹	108.6 ¹	36.6	k.A.	79.2
Dachs G 5.5 / Senertec	21.000,00	1	580	3600	5.5	12.5 / 14.8 ¹	27.0	61.0 / 72.0 ¹	88.0 / 99.0 ¹	22	k.A.	349
Ecopower 4.7 / Vaillant (Power-Plus)	17.000,00	1	272	modul. - 3600	modul. - 4.7	modul. - 13.8	25	65	90.0	115	k.A.	50
Energator GB 7.5 / Giese Energie	23.500,00	3	996	1500	7.5	15.0 / 18.6 ¹	27.37	67.88 ¹	95.26 ¹	< 150	< k.A.	< 125
Vitobloc 200 EM-6 / Viessmann	26.000,00	3	952	1500	6	14.9 ¹	27,0	67,0 ¹	94,0 ¹	< 300	< k.A.	< 250
green two / Green Energy Sol.	k.A.	3	k.A.	2200	6.9	18.7	23.0	60.4	83.4	210	k.A.	249
GTK 7 / Kuntschar + Schlüter	k.A.	3	972	1540	7.0	18.0	24.1	62.1	86.1	< 150	< k.A.	< 125
Muscetier NG 10 / ETZ GmbH & Co. KG	k.A.	3	1000	1500	modul. - 7.5	modul. - 19.6 ¹	30.7	58.6 / 72.5 ¹	89.3 / 103.2 ¹	120	k.A.	20
XRGI 6 / EC Power	19.000,00	3	1000	1500	6	13.7 ¹	30.1	64 / 68.7 ¹	94.1 / 98.7 ¹	< 150	< k.A.	< 125
6TO / Indop	k.A.	3	953	1500	6	13.9 ¹	28.2	65.3 ¹	93.5 ¹	70	k.A.	85

¹ mit Brennwertnutzung über Kondensier

² technisches Potential (vgl Tabelle 2)

³ Basis-Listenpreis ohne Zubehör und Spitzenkessel

Tabelle 5: Vergleich des Aladin II mBHKW mit ausgewählten, kommerziellen Blockheizkraftwerken

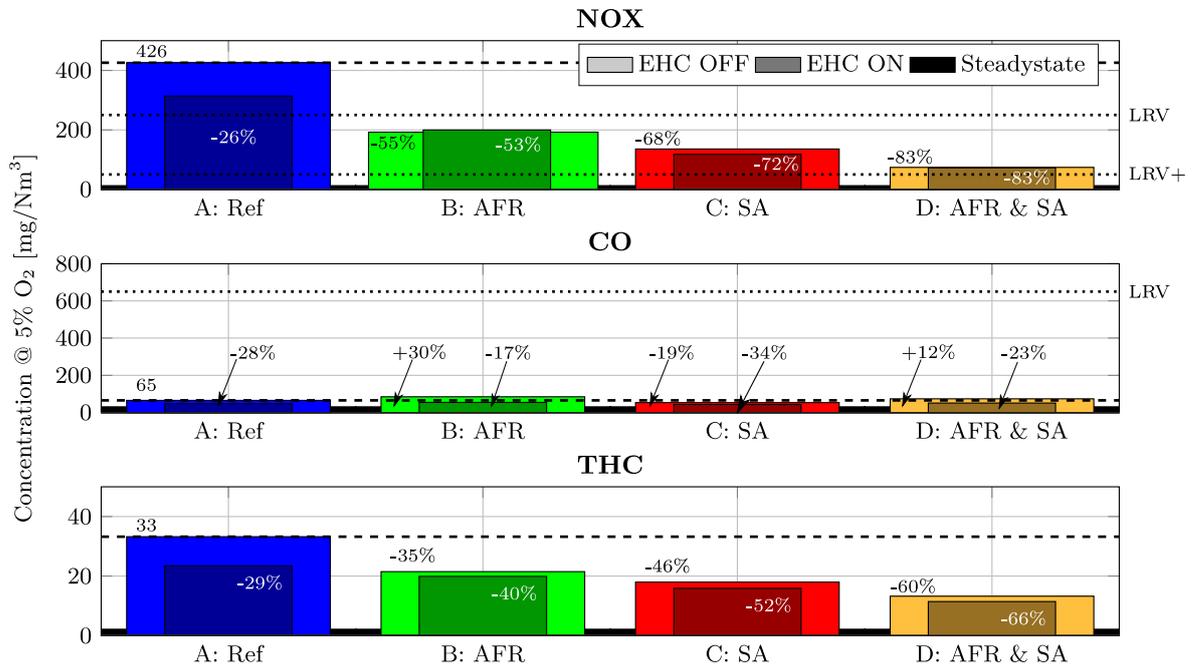


Abb. 35: Forschungsergebnisse zur Emissionsreduktion während des Kaltstarts aus dem parallel laufenden F&E Projekt [2]. Die Balken zeigen die zeitlich gemittelte Konzentration der Emissionen über einen eine Stunde dauernden Betrieb mit Kaltstart. Diese werden mit den gesetzlichen Grenzwerten im Stationärbetrieb (punktiert) sowie den effektiven Stationäremissionen von Aladin II (schwarzer Balken) verglichen. Gestrichelt ist jeweils der Referenzfall (keine Strategie angewandt) dargestellt.



Schlussfolgerungen

(Motorex Bucher AG, Hoval Aktiengesellschaft)

Motorex Bucher AG

Motiviert durch die interessanten Ergebnisse aus dem vorgängigen BFE-Projekt **„Auslegung und Realisierung von WKK-Anlagen mit „Null“-Schadstoffpotential unter besonderer Berücksichtigung biogener Energieträger“**, auch als ALADIN I betitelt [1], wurde bereits 2013 über die Weiterführung der begonnenen Forschungsarbeiten in Form eines Anschlussprojektes nachgedacht. Allerdings fehlte es anfänglich an einem Technologie- und Wirtschaftspartner für die spätere kommerzielle Umsetzung der Projektergebnisse in Form einer BHKW-Serienfertigung. Mit der Firma HOVAL AG, Vaduz, einer führenden Unternehmung im Bereich von Heizungen, Lüftungen, Klima-, WKK- und Solaranlagen mit internationaler Erfahrung, konnte diese Lücke ideal geschlossen werden.

Unter dem Arbeitstitel „Aladin II“ wurden zwei miteinander verbundene Teilprojekte gebildet und die Ziele und Zusammenarbeit der jeweiligen Projektpartner vertraglich geregelt.

F+E Projekt (BFE Energieforschung)

Aladin II – Entwicklung eines Gasbetriebenen, Hochflexiblen „Near-Zero“ Emission Mikro-Blockheizkraftwerks

P+D Projekt (BFE Sektion Cleantech)

Aladin II – Aufbau und Betrieb von fünf Prototypenanlagen eines gasbetriebenen, hochflexiblen, „near-zero Emission“ Klein-BHKW

Aufgrund der starken gegenseitigen Abhängigkeit beider (Teil-) Projekte wurden sämtliche Arbeiten mit einem gemeinsamen Projektteam durchgeführt und besprochen.

Die Zielsetzung der P+D Projektes bestand darin, mittels Betriebes von 5 Anlagen aufzuzeigen, dass die hohen Wirkungsgrade aus dem Projekt Aladin I auch im Langzeitbetrieb reproduzierbar seien. Mehr noch sollten die Versuche Schwachstellen und Verbesserungspotentiale aufzeigen, zur Unterstützung weiterführender Schritte hin zu einer möglichen Markteinführung des Systems „Aladin“. Bezüglich der Motivation und Zielsetzungen seitens MOTOREX sei an dieser Stelle auf den Schlussbericht des F+E Projektes [2] hingewiesen.

Hoval Aktiengesellschaft

Bei Projektstart ist das Konsortium davon ausgegangen, dass nach dem Vorläuferprojekt ALADIN I der seriennahe Einzylinder-Benzinmotor als Gasmotor entsprechend ausgereift sei. Im Laufe des Projektes ALADIN II sind jedoch unerwartet grosse Bemühungen in die Weiterentwicklung hin zu einem stabilen Gasmotor geflossen. Zu Projektende lässt sich noch keine quantitative Aussage zu einer realistischen Standzeit des Motors im Gasbetrieb treffen.

Auch hat das ursprüngliche konstruktive Verbindungskonzept zwischen Motor-Schwungrad-Elektrogenerator aufgegeben werden müssen. Dieses flexible Konzept ist für eine Umsetzung in der Serie auf Grund der schnellen Tauschmöglichkeit der Verbrennungsmotoreinheiten im Rahmen eines jährlichen Service sehr interessant und stellt somit einen bedeutenden Verlust im Gesamtkonzept dar.



Obwohl als Basis ein seriennaher Benzinmotor verwendet wird, sind der Gasmotor selbst sowie weitere Komponenten wie z. B. Motoranschlüsse, elektrischer Generator, Schwungrad, Lager und Schwingungsdämpfer bzw. Schwingungsentkoppler, etc. noch nicht durchgängig auf Serienstand oder sogar noch in grundlegender Abklärung für den Betrieb in einer stationären Anlage. Es wären noch intensive Betrachtungen, Weiterentwicklungen und Definitionen diverser Einzelkomponenten und Teilsysteme notwendig, bevor eine Neukonzipierung dieses mBHKW-Gesamtsystems aus Sicht eines Heiztechniksystemanbieters wirtschaftlich sinnvoll erscheint.

Der BHKW Markt in seiner derzeitigen Form ist erschlossen und der Wettbewerb wird von den Anschaffungs- und Betriebskosten getrieben. Zum derzeitigen technischen Stand des mBHKW-Systems sollte eine Aktualisierung der Evaluierung der Rahmenbedingungen am BHKW Markt (Wettbewerb, Preisgestaltung, Fördersituation, ...) erfolgen um die wirtschaftlichen Marktaussichten, Preisziele und technischen Konzepte neu zu bewerten. Zur wirtschaftlichen Bewertung und Machbarkeit möglicher fortführender Projekte wird es auch wesentlich sein, in wie weit BHKW bzw. mBHKW Schwarmkonzepte z. B. in der Schweiz auch von Seiten der Eidgenossenschaft aufgegriffen, gefördert oder durch Einflussnahme auf z.B. Kontraktoren vorangetrieben werden. In diesem Umfeld und zum derzeitigen Entwicklungsstand des hier behandelten mBHKW Systems liegen die wirtschaftlichen und technischen Prioritäten eines Heiztechniksystemanbieters bei anderen Systemen und Sektoren.



Referenzen

- [1] Aladin I Schlussbericht
Auslegung und Realisierung von WKK-Anlagen mit „Null“ – Schadstoffpotential unter besonderer Berücksichtigung biogener Energieträger
Juni, 2014

- [2] Aladin II F&E Schlussbericht
Entwicklung eines Gasbetriebenen, Hochflexiblen „Near-Zero“ Emission Mikro-Blockheizkraftwerks
SI/501278-01
Dezember 2019
Aramis: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36886>

- [3] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
Mini-WKK-Zuschuss bis 20 kWel
URL: http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Kraft_Waerme_Kopp-lung/Mini_WKK/mini_WKK_node.html
Abruf im Dezember 2018

- [4] Stadt Zürich
Emissionskontrolle
URL: https://www.stadt-zuerich.ch/gud/de/index/beratungen_bewilligungen/ugz/betriebe/kontrollen/emissionen/emissionskontrolle.html
Abruf im Dezember 2018

- [5] Bundesamt für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Entwurf zur Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
URL: <https://www.bmu.de/gesetz/entwurf-zur-neufassung-der-ersten-allgemeinen-verwaltungsvorschrift-zum-bundes-immissionsschutzgesetz/>
Abruf im Dezember 2018