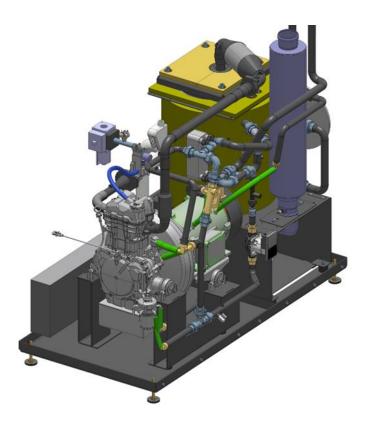


Bundesamt für Energie BFE Energieforschung

Schlussbericht

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



Aladin II – Visualisierung der Prototypenanlage



Datum: 26. November 2019

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE Forschungsprogramm "Verbrennungsbasierte Energiesysteme" CH-3003 Bern www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Bucher AG Langenthal Motorex Schmiertechnik Bern-Zürichstrasse 31 CH-4900 Langenthal www.motorex.com

Auftragnehmer/in:

Bucher AG Langenthal Motorex Schmiertechnik Bern-Zürichstrasse 31 CH-4900 Langenthal www.motorex.com

ETHZ
Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik (IDSC)
Sonneggstrasse 3
8092 Zürich
www.idsc.ethz.ch

ETHZ Institut für Energietechnik (LAV) Sonneggstrasse 3 8092 Zürich www.lav.ethz.ch

Autor/in:

Markus Staubli, Bucher AG Langenthal Motorex
Prof. Christopher Onder, ETHZ, IDSC
Prof. Konstantinos Boulouchos, ETHZ, LAV
Christian Schürch, ETHZ, LAV
Tammo Zobel, ETHZ, IDSC

markus.staubli@motorex.com
onder@idsc.mavt.ethz.ch
boulouchos@lav.mavt.ethz.ch
schuercc@lav.mavt.ethz.ch
tzobel@idsc.mavt.ethz.ch

BFE-Bereichsleitung:Carina Allescarina.alles@bfe.admin.chBFE-Programmleitung:Stephan Renzinfo@renzconsulting.chBFE-Vertragsnummer:SI/501278-01

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

Im Rahmen des vorliegenden F&E Projektes wurde eine hoch flexible und hoch effiziente mBHKW Anlage entwickelt mit welcher auch die Ölentwicklung für Gasmotoren vorangetrieben werden konnte. In einem parallel dazu verlaufenden Pilot- und Demonstrationsprojekt (P&D Projekt) [2] wurden vier weitere Anlagen mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen gebaut und betrieben. Eine an der ETH entwickelte Anlagensteuerung für den autonomen Betrieb ermöglicht zusammen mit einer ebenda entwickelten Lambda- und Wasserkreislaufregelung den schadstoffarmen, effizienten und sicheren Stationärbetrieb sowie die Übertragung der Messdaten. Zudem kann die Anlage per Fernwartungszugriff übers Internet beobachtet, bedient und mit Softwareupdates ausgestattet werden. Die Anlage erreicht bei Volllast 7.5 kW elektrische Leistung einen elektrischen Wirkungsgrad von 32% sowie einem thermischen Wirkungsgrad von 56%. Die Schadstoffkonzentrationen liegen im Stationärbetrieb mit <10 mg/Nm³ NOx, <35 mg/Nm³ CO und <5 mg/Nm³ THC (total hydro carbon) 25 (NOx) bis 20 (CO) mal tiefer als die gesetzlichen Grenzwerte der LRV. THC Emissionen sind zur Zeit nicht limitiert.

Die Unterscheidung zwischen Stationärbetrieb und Kaltstartphase ist entscheidend für die Regelung der Wasserkreisläufe sowie der Motorparameter wenn über den ganzen Betrieb optimale Bedingungen bezüglich Verfügbarkeit von Wärme und minimalen Schadstoffemissionen gelten sollen. Für ein schnelles Aufwärmen der Anlage wurde deshalb eine gegenüber dem Stationärbetrieb angepasste Regelung des Wasserkreislaufes entwickelt. Um die Kaltstartemissionen zu minimieren wurden aufgrund einer Projektstudie zu möglichen Systemen drei Methoden weiterverfolgt, umgesetzt und weiterentwickelt. Mit der Kombination aus zwei rein softwaremässig umsetzbaren Strategien lassen sich die akkumulierten Schadstoffmassen während einer mit einem Kaltstart beginnenden Laufzeit von einer Stunde gegenüber dem Referenzfall um 82% (NOx) und 62% (THC) reduzieren. Ein Anstieg der total akkumulierten CO Masse um 15% wird in Kauf genommen, da der Grenzwert der LRV sogar gemittelt über diesen Kaltstart immer noch um das 8.9-Fache unterschritten wird.

Mit dem optimierten Kaltstartverhalten eignet sich die entwickelte Anlage sehr gut für Netzstabilisierungsaufgaben z.B. als Teil eines BHKW-Schwarmes.

Résumé

Dans le cadre du projet de recherche et développement «Aladin II», une unité de production combinée de chaleur et d'électricité (mCHP) très flexible et hautement efficace a été développée. En parallèle, les connaissances acquises ont permis de construire et opérer quatre mCHP supplémentaires lors d'un projet pilote et de démonstration (P&D) [2]. L'ETH Zurich a mis au point un système de contrôle permettant de faire fonctionner l'unité de manière autonome. La conception et la mise en œuvre de systèmes de contrôle dédiés au rapport air / carburant ainsi qu'aux circuits hydrauliques permettent au mCHP de fonctionner en toute sécurité avec des émissions quasi nulles et des rendements élevés en régime permanent. Un système de transfert de données et de contrôle à distance sur mesure permet de diagnostiquer rapidement et facilement des données, ainsi que de traiter et d'analyser les données. Le mCHP fonctionne à pleine charge et atteint une puissance électrique de 7,5 kW, un rendement électrique de 32% et une efficacité thermique de 56%. Les émissions de polluants à l'état d'équilibre sont en moyenne inférieures à 10 mg / Nm³ pour les oxydes d'azote (NOX), <35 mg / Nm³ pour le monoxyde de carbone (CO) et <5 mg / Nm³ pour les hydrocarbures totaux (THC). Pour le NOX, il s'agit d'environ 25 et pour le CO d'environ 20 fois plus bas que les limites réglementaires de l'Ordonnance sur la protection de l'air suisse (LRV). Le THC n'est pas limité à ce jour.



Une distinction a été établie entre la phase de démarrage et la phase de démarrage à froid. Cela est essentiel pour le contrôle des circuits hydrauliques ainsi que pour les paramètres du moteur afin de garantir un comportement optimal en matière d'émission et des rendements sur toute la plage de fonctionnement. Pour minimiser les émissions de polluants pendant la phase de démarrage à froid, une étude expérimentale a été menée pour étudier le potentiel de trois méthodes clés pour optimiser le comportement des émissions. Les résultats démontrent que la combinaison de deux stratégies basées sur un logiciel conduit à une réduction des émissions cumulées de polluants de -82% (NOX) et -62% (THC) par rapport à un cas de référence pour une période de mesure d'une heure. Cependant, le monoxyde de carbone atteint environ + 15%. Ceci est considéré comme acceptable car cette performance de démarrage à froid reste inférieure à la limite de l'Ordonnance sur la protection de l'air suisse par un facteur de 8,9.

Avec le comportement optimisé de démarrage à froid, l'unité mCHP développée est appropriée pour fournir des services de stabilité de réseau, par ex. dans le cadre d'un essaim de cogénération.

Summary

In the context of the R&D project "Aladin II", a highly flexible and highly efficient micro combined heat and power unit (mCHP) has been developed which has been also utilized to drive forward the development of a specialized oil for gas engines. With the knowledge gained, four further plants were built and operated within a parallel pilot and demonstration project (P&D project) [2]. ETH Zurich has developed a supervisory system control that enables the unit to be operated autonomously. The design and implementation of dedicated control systems for the air/fuel ratio as well as the hydraulic circuits allows the mCHP to operate safely with near-zero emissions and high efficiencies under steady-state conditions. A tailored data transfer and remote control system provides means for quick and easy diagnosis capabilities as well as streamlined data processing and subsequent analysis. The mCHP is operated under full load and reaches an electrical power output of 7.5 kW, an electrical efficiency of 32% and a thermal efficiency of 56%. The pollutant emissions under steady-state conditions average out at <10 mg/Nm³ for nitrogen oxide (NOX), <35 mg/Nm³ for carbon monoxide (CO) and <5 mg/Nm³ for total hydrocarbons (THC). For NOX this is about 25 and for CO about 20 times lower than the regulatory limits of the swiss clean air act (LRV). THC are not limited to date.

A distinction has been drawn between the steady-state and the cold-start phase. This is pivotal for the control of the hydraulic circuits as well as the engine parameters, if optimal emission behavior and maximized efficiencies have to be ensured throughout the entire range of operation. For the minimization of pollutant emissions during the cold-start phase, an experimental study has been conducted that investigates the potential of three key methods to optimize the emission behavior. The results demonstrate that the combination of two portable, software-based strategies leads to a reduction of the cumulated pollutant emissions of -82% (NOx) and -62% (THC) compared to a reference case for a one-hour measurement period. However, carbon monoxide rises by about +15%. This is deemed to be acceptable as this cold-start performance still goes below the limit of the swiss clean air act (LRV) that holds for steady-state conditions by a factor of 8.9.

With the optimized cold-start behavior, the developed mCHP unit is suitable for providing grid stability services, e.g. as a part of a CHP-swarm.



Abkürzungsverzeichnis

BHKW Blockheizkraftwerk

CO Kohlenstoffmonoxid

ETH Eidgenössische Technische Hochschule

F&E Forschung- und Entwicklung

HC Kohlenwasserstoffe

LRV Luftreinhalte-Verordnung

MBT Maximum Brake Torque

NOx Stickoxide

PT Pilotanlage

SA Spark Advance (Zündvorzug)

TRL Technology Readiness Level

WKK Wärme-Kraft-Kopplung



Inhaltsverzeichnis

IN	IHALTS	SVERZEICHNIS	6
1	EIN	LEITUNG	7
2	ZIE	LSETZUNG	8
3	AU	FBAU UND AUSLEGUNG DER ANLAGE	9
	3.1	VERBRENNUNGSMOTOR	9
	3.2	GENERATOR UND ANBINDUNG	10
	3.3	GESAMTANLAGE	12
4	STE	UERUNG UND REGELUNG	15
	4.1	Steuerung	15
	4.2	REGELUNG	18
	4.2	.1 Luftpfadregelung	18
	4.2	.2 Regelung des Hydrauliksystems	21
	4.3	Betriebskonzept	29
	4.4	Fernwartungszugriff & Datenmanagement	30
5	MII	NIMIERUNG DER KALTSTARTEMISSIONEN	32
	5.1	EMISSIONSPROBLEMATIK VON 3-WEGE-KATALYSATOREN	32
	5.2	METHODEN ZUR KALTSTARTEMISSIONSMINIMIERUNG	33
	5.2	1 Übersicht	33
	5.2	.2 Zündwinkelverschiebung	35
	5.2	.3 Anpassung der Lambdaregelung	37
	5.2	.4 Abgasspeichersystem	40
	5.2	.5 Sekundärluftsystem	42
	5.2	.6 EHC-System	43
	5.2		
	5.2		
	5.3	Experimentelle Untersuchungen	
	5.4	Resultate	
	5.5	DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG	53
6	ÖLE	ENTWICKLUNG (BUCHER AG MOTOREX)	55
	6.1	EINLEITUNG	55
	6.2	BESCHRIEB ARBEITSPAKET "ENTWICKLUNG EINES LONGLIFE-LEICHTLAUF-SCHMIERÖLS FÜR GASMOTOREN"	55
	6.2	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
	6.2	7 7 7 9	
	6.2	, and the second se	
	6.2	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
		BHKW-Demonstration-Objekte (Standorte MOTOREX, HOVAL, SWISSAUTO	
	6.2	.5 To do's for the Future / Pendenzen:	61
7	ZUS	SAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	62
8	REF	ERENZEN	64



1 Einleitung

Die Zukunft des nationalen und weltweiten Energiesystems wird von einer zunehmenden Effizienzsteigerung und der Marktdurchdringung erneuerbarer Energien geprägt sein. Ein wachsender Anteil der Elektrizität an der Endenergie wird sich kontinuierlich einstellen, weil damit Energiedienstleistungen effizienter und sauberer erbracht werden können. Zumindest in Mitteleuropa darf jedoch mittelfristig von einem abnehmenden Anteil der nuklearen Stromerzeugung ausgegangen werden, was in der Schweiz energiepolitisch als gestaffelter Ausstieg vom Bundesrat vorgezeichnet wurde.

Ein effizienter Weg um das Stromnetz der Zukunft, gekennzeichnet durch höhere, stochastisch anfallende Anteile an Sonnen- und Windenergie zu stabilisieren, besteht in der Anwendung der dezentralen Wärme-(Kraft-) Stromproduktion (im weiteren WKK, beziehungsweise Blockheiz-Kraftwerk BHKW genannt).

WKK-Anlagen nutzen die Exergie des wertvollen Ausgangsbrennstoffs viel effizienter als bei einer einfachen Wärmeerzeugung und sind, abhängig von Anlagegrösse sowie Temperatur der nutzbaren Wärme, thermodynamisch mindestens so effizient wie die zentrale Lösung mittels Gaskombikraftwerken (GuD). Die dezentrale WKK-Technik kann zusätzlich am ehesten lokal/regional verfügbare Biomasse (Holzgas; Bio-/Kompogas, Biomethan, allenfalls Bioethanol) hocheffizient verwerten, womit ein Beitrag zur Erreichung der Energie- und Klimaziele der Schweiz geleistet werden kann.

Voraussetzung dazu ist aber einerseits eine flexible, grundsätzlich stromgeführte Betriebsweise und andererseits, zumindest mittelfristig, die "Multi-Fuel"-Befähigung des WKK-Systems.

Verbrennungsmotorische Wandler sind zur Erfüllung dieser Randbedingungen aufgrund ihrer Flexibilität und Spitzenlastfähigkeit am ehesten geeignet. Um die Wärmebedarfsprofile am jeweiligen dezentralen Standort erfüllen zu können müssen die Anlagenleistungen darauf abgestimmt sein. Im Gegensatz zu grossen Anlagen ist es bei kleineren Verbrennungsmotor basierten Anlagen mit weniger als 100kW elektrischer Leistung (Mikro- und Mini-BHKW) schwieriger hohe elektrische Wirkungsgrade zu erreichen.

Für den Einsatz in der Schweiz müssen die Anlagen im Hinblick auf Schadstoffemissionen einerseits die LRV-Vorschriften erfüllen und andererseits die spezifischen Emissionswerte moderner GuD-Kraftwerke als Benchmark unterbieten. Bei Mikro- und Mini-BHKW's mit 3-Wege Katalysatoren können die kumulierten Emissionen, welche während der Aufwärmphase anfallen, bis über 95% der total anfallenden Emission während einer Stunde Laufzeit ausmachen. Deshalb werden Kaltstartemissionen hinsichtlich einer veränderten Start- / Stoppcharakteristik eines stromgeführten BHKW's zusehends ein stärker zu gewichtendes Kriterium.

Im Vorgängerprojekt Aladin I [1] wurde ein Verbrennungsmotor als Herzstück einer BHKW-Anlage ausgewählt und bezüglich Effizienz und Leistung für den vorgesehenen Betriebspunkt optimiert. Abgastraktlänge und Ventilhubkurven wurden mittels 1-D Software optimiert und die Bauteile auch entsprechend angepasst und verbaut. Mit einer Konzeptanlage (TRL Stufe 3-4) konnte ein sehr hoher mechanischer Wirkungsgrad sowie sehr tiefe Stationäremissionen demonstriert werden. Für ein Folgeprojekt waren jedoch gewisse Komponenten dieser Konzeptanlage nicht geeignet, da sie zu teuer waren oder der Hersteller in der Zwischenzeit Insolvenz anmelden musste und nicht mehr liefern konnte.



2 Zielsetzung

Aus den Rahmenbedingungen, wie sie in der Einleitung erläutert wurden, lassen sich folgende vier Zielsetzungen für das vorliegende Projekt ableiten, welche im Weiteren erläutert werden:

- Weiterentwicklung der Konzeptanlage aus dem Vorgängerprojekt und Überführung in eine möglichst seriennahe Prototypenanlage
- 2. Entwurf einer Steuerung und Regelung des Systems für den Stromnetz-geführten Betrieb
- 3. Optimierung von Emissionen und Verbrauch im Kaltstart und Warmlauf
- 4. Entwicklung eines Leichtlauf-Schmieröls mit hoher Lebensdauer für Stationär-Gasmotoren

Die Weiterentwicklung der Konzeptanlage beinhaltet die Konstruktion, den Bau, die Inbetriebnahme sowie die Charakterisierung und Optimierung einer möglichst seriennahen BHKW-Prototypenanlage (TRL Stufe 5-6), aufbauend auf dem Motor und den Ergebnissen aus dem Vorgängerprojekt. Entsprechend wird der Motor mit Anpassungen übernommen und mit Anlagenkomponenten ergänzt, sodass eine kompakte Komplettanlage entsteht, welche auf Dauerfestigkeit und Betriebsstrategien geprüft werden kann. Bei der Auslegung der Einzelkomponenten der Anlage sowie dem Arbeitsprozess stehen stets einen maximalen Wirkungsgrad und möglichst niedrige Emissionen im Vordergrund. Eine enge Zusammenarbeit mit der Hoval AG im Rahmen des parallel laufenden Pilot- und Demonstrationsprojektes (P&D-Projekt) (SI/501300-1) [2], vereinfacht die Auslegung und Auswahl von Komponenten für den Wasserkreislauf. Auch das Kapseln und die Konstruktion der Gesamtanlage sowie die Montage der fünf Anlagen (PT1 – PT5) wird in Zusammenarbeit mit der Hoval AG durchgeführt.

Die Steuerung und Regelung des Systems sollte von Grund aufgebaut und auf die neuen Komponenten zugeschnitten sein. Ein autonomer Betrieb sowie die Möglichkeit die Anlage per Remote-Signal ein- und auszuschalten sind die Voraussetzungen für ein BHKW mit Netzstabilisierungsaufgaben und somit den strom-geführtem Betrieb. Die Möglichkeit eines Fernwartungszugriffs auf die dezentral aufgestellten Anlagen sollte genauso gegeben sein wie die automatische Datensicherung der aufgezeichneten Messwerte.

Um die Emissionen während der Aufwärmphase der Maschine minimieren zu können müssen geeignete Messgeräte installiert und der Status Quo exakt erfasst werden. Für einen Kaltstart wird der Zustand der Maschine über die Temperatur der Bauteile und Flüssigkeiten definiert. Als Grundvoraussetzung zur Erfüllung des dritten Zieles ist das Erreichen der beiden Vorangestellten (Entwicklung und Bau des BHKW's sowie dessen Steuerung). Die Entwicklung der Steuerung und der Maschine muss abgeschlossen sein, da sonst nicht reproduzierbare Ergebnisse der Emissionsmessungen resultieren.

Für die Entwicklung eines Leichtlauf-Schmieröls ist es entscheidend zuerst eine ausführliche Analyse des Basisöls zu machen. Danach können verbesserte Öle, welche mit den geeigneten Additiven versetzt wurden an den Maschinen getestet werden. Für die Analyse sind zwingend genügend Ölproben aus dem laufenden Betrieb der Maschinen nach unterschiedlichen Laufzeiten nötig. Es müssen also nach Möglichkeit mehrere Maschinen mit möglichst langer Einsatzdauer des Öls vorhanden sein. Von den 5 Anlagen wird PT1 für das F&E-Projekt an der ETHZ genutzt während die weiteren Anlagen für die Dauerversuche im Rahmen des P&D-Projekts vorgesehen sind. Alle Anlagen, jedoch vor allem PT2-5, sollen Daten für die Ölentwicklung liefern. Ein detaillierter Beprobungsplan wird von der Bucher AG Langenthal Motorex ausgearbeitet und von der ETH in der Motorsteuerung hinterlegt um sicherzustellen, dass die Ölproben bei jeder Maschine zur rechten Zeit gezogen werden.



3 Aufbau und Auslegung der Anlage

3.1 Verbrennungsmotor

Als Antriebseinheit wurde der 1-Zylinder, 4-Takt Motor von Swissauto Powersport LLC verwendet. In seiner ursprünglichen Anwendung als Range-Extender in Freizeit- und Motorsport Fahrzeugen wird der Motor stöchiometrisch mit Benzin betrieben und entspricht der geforderten Leistungsklasse von 5 bis 10 kW. Durch die standardmässig verbauten Wälzlager an Kurbelwelle und Pleuel weist der Motor bereits eine geringe Reibung auf und hat für seine Leistungsklasse einen hohen Wirkungsgrad. Der stöchiometrische Verbrennungsprozess lässt den Einsatz eines 3-Wege Katalysators zu, womit die Stationäremissionen bei geeigneter Lambdaregelung tief gehalten werden können.

Der Serienmotor wurde für das vorliegende Projekt auf Gasbetrieb bei konstanter Drehzahl und Volllast umgerüstet. Aufgrund der Erfahrungen aus Aladin I wurden hierfür die Nockenwellen, Ventile und Ventilsitzringe ausgetauscht. Die Ventile und Sitzringe wurden wegen der wegfallenden Schmierung durch das Benzin mit hochwertigerem Material ersetzt, welches für die Gasanwendung geeignet ist. Zudem wurde die Geometrie der Ventile und Sitzringe angepasst um den Verschleiss zusätzlich zu minimieren. Die Nockenwelle wurde durch eine solche mit für den Volllastbetrieb bei 3000 1/min optimierten Ventilsteuerzeiten ersetzt. Es wurde bei der Auslegung der Nockengeometrie auf möglichst tiefe Ventileinschlaggeschwindigkeiten geachtet. Die optimierte Nockenform konnte aus der Seriennockenwelle geschliffen werden. Um die Abriebfestigkeit der abgeschliffenen Nockenwelle zu garantieren, musste eine zusätzliche Oberflächenbehandlung in den Produktionsprozess eingebunden werden.

Ein weiterer Schritt zur Wirkungsgradoptimierung war die Optimierung der Ansaug- und Abgastraktlängen. Diese wurden analog dem Vorgehen im Vorgängerprojekt Aladin I [1] mit Hilfe eines Motorensimulationsprogramms optimiert, die errechneten Längen sind später in die Konstruktion der Ansaug- und Abgastrakte miteingeflossen. Zur Minimierung der Abgasemissionen wurde ein 3-Wege Katalysator für den Gasbetrieb im Abgastrakt eingebaut. Das Verhältnis der Edelmetalle in der Beschichtung ist hierbei anders als bei Benzin Katalysatoren.

Die 5 umgerüsteten und optimierten Aladin II Motoren wurden vor dem Einbau in der Komplettanlage auf dem Motorenprüfstand an der ETH/LAV vermessen. Beim Motor aus dem Vorgängerprojekt Aladin I [1] wurde damals das Verdichtungsverhältnis zwecks Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung von 11.9 auf 13 erhöht. Die Aladin II Motoren entsprechen von der Brennraumgeometrie wieder dem Originalmotor. So sollte die Lagerbelastung minimiert werden unter der Prämisse, dass u.U. kleine Einbussen im Wirkungsgrad in Kauf genommen werden müssen. Im Folgenden werden jeweils die 5 Aladin II Motoren mit dem Aladin I Motor verglichen. Dieser wurde im Rahmen des Vorprojektes im Jahre 2013 vermessen [1].

Mechanische Leistung

Abb. 1 zeigt die Wellenleistung aller 5 Aladin II Motoren sowie jene vom Aladin I Motor. Grundsätzlich liegen die Leistungen der Aladin II Motoren leicht über derjenigen vom Aladin I Motor, obwohl letzterer ein höheres Verdichtungsverhältnis von 13 aufwies. Dies lässt sich einerseits mit einer verbesserten Gasdynamik und andererseits damit erklären, dass der Serienmotor in der Zwischenzeit von Polaris bereits weiterentwickelt wurde. Die Längen der Gastrakte wurden gegenüber Aladin I nochmals optimiert und es wurde ein anderer Venturimischer verwendet, welcher weniger Strömungswiderstand aufweist. Die verbesserte Gasdynamik schlägt sich auch in den Wirkungsgraden (vgl. Abb. 2) nieder.



Die Streuung unter den Aladin II Motoren ist sehr klein. Die relative Standardabweichung liegt über alle gemessenen Grössen stets unter 3 %.

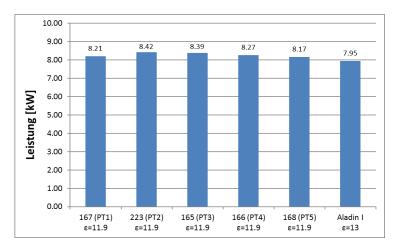


Abb. 1: Vergleich der mechanischen Leistung der 5 Aladin II Motoren und dem Aladin I Motor mit erhöhtem Verdichtungsverhältnis.

Wirkungsgrade

Die Motorenwirkungsgrade aller Aladin II Motoren sind minim höher als jener des Aladin I Motors (siehe Abb. 2). Dies ist wie bereits oben erwähnt auf den besseren Gaswechsel sowie auf die Weiterentwicklung des Grundmotors zurückzuführen. Die Motoren zeigen auch hier kaum Abweichungen untereinander.

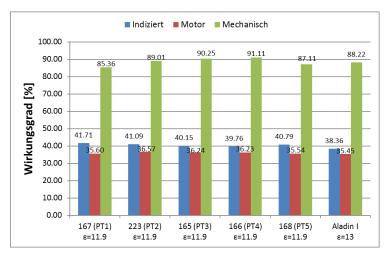


Abb. 2: Vergleich der Effizienzen der 5 Aladin II Motoren und dem Aladin I Motor mit erhöhtem Verdichtungsverhältnis.

3.2 Generator und Anbindung

Der wassergekühlte Asynchrongenerator wurde speziell für diese Anwendung von der Elektromotorenwerk Brienz AG (EMWB) entwickelt. Asynchrongeneratoren haben den Vorteil, dass weder eine Erregerspannung, noch eine Leistungselektronik für die Netzsynchronisation notwendig ist. Es ist mit solchen Drehstrommaschinen jedoch nicht möglich ohne Netzspannung das BHKW zu starten, was für ein Insel- respektive Notstromkonzept nötig wäre. Da jedoch die Aladin II Anlage z.B. als Teil



eines grösseren BHKW-Schwarmes Netzstabilisierungsaufgaben lösen soll [3], ist diese Funktionalität nicht Teil des Anforderungskataloges. Um zwecks Effizienzsteigerung des Gesamtsystems die Abwärme des Generators nutzen zu können muss dieser wassergekühlt sein und kann damit direkt in den Kühlkreislauf der übrigen Anlage eingebunden werden.

Die mechanische Anbindung des Generators an den Motor wurde von Swissauto Powersport LLC in Burgdorf (nachfolgend Polaris genannt) in enger Zusammenarbeit mit dem ETH Labor für Aerothermochemie und Verbrennungsforschung (nachfolgend LAV genannt) konstruiert. Wegen der charakteristischen Drehzahlschwankungen von Einzylindermotoren ist ein Schwungrad als Schwingungsdämpfer zwingend notwendig. Dieses wurde vom LAV ausgelegt und von Polaris konstruiert. Die Randbedingungen seitens Generatorhersteller sowie die errechneten Drehzahlschwankungen sind in Abb. 3 dargestellt.

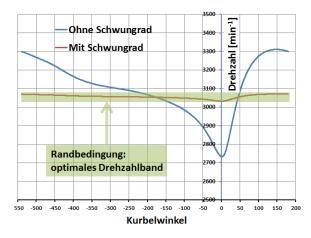
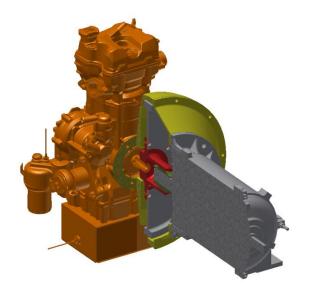


Abb. 3: Berechnete Drehzahlverläufe über einen Motorzyklus aufgrund von Zylinderdruckmessungen. Diese Rechnungen dienten als Auslegungsgrundlage des Schwungrades.

Der Einbauort des Schwungrades relativ zu Verbrennungsmotor, Kupplung und Generator wirkt sich entscheidend auf die wirkenden Kräfte an den Lagern der beiden Maschinen sowie auf das Drehmoment an der Kupplung aus. Der Drehmomentverlauf über einen Verbrennungszyklus ist für die Aladin II Konstruktion (Abb. 4) in Abb. 5 dargestellt. Aufgrund der Generatorlager- und Kupplungsbelastung wurde entschieden das Schwungrad direkt am Kurbelwellenabgang des Verbrennungsmotors zu montieren. Das nun geglättete Drehmoment wird anschliessend über eine Zahnwellenverbindung auf die Generatorwelle übertragen. Um axiale Kräfte und somit Verschleiss in der Zahnwellenverbindung zu vermeiden wurde Motor und Generator über ein steifes und somit tragendes Schwungradgehäuse verbunden (siehe Abb. 4). Verbrennungsmotor, Schwungrad und Generator bilden somit einen zusammenhängenden Körper, welcher wiederum mit Schwingungsdämpfern auf dem BHKW-Rahmen gelagert ist.



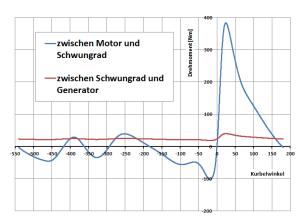


Abb. 4: 3D-CAD Visualisierung der GenSet Konstruktion für Aladin II.

Abb. 5: Errechneter Drehmomentverlauf über einen Zyklus vor und nach dem Schwungrad.

3.3 Gesamtanlage

Abb. 6 zeigt eine schematische Übersicht des gesamten Anlagenaufbaus. Zur besseren Übersichtlichkeit sind Peripheriekomponenten wie Sensoren, Sicherheitsgruppen oder Ausgleichsgefässe nicht aufgeführt. Den zentralen Baustein der Anlage bildet die in den Kapiteln 3.1 und 3.2 beschriebene Einheit aus Verbrennungsmotor, Generator und Schwungrad. Die vom Generator produzierte elektrische Energie wird über den Schaltkasten an das Stromnetz übertragen und bei Bedarf vor Ort verbraucht oder rückgespeist.

Das Verbrennungsgemisch wird luftseitig über einen Ansaugtrakt mit Einlassfilter und gasseitig über den Anschluss an das Erdgasnetz bereitgestellt. Über einen Venturimischer wird dem Verbrennungsmotor das Treibstoff/Luft-Gemisch zugeführt. Heutige, am Markt verfügbare Venturimischer können in stationären Anwendungen die Regelung des Treibstoff-Luft-Gemisches ausführen. Die Regelung erfolgt jedoch sehr langsam und ist bei strikten Anforderungen an die Genauigkeit nicht zweckmässig. Da im vorliegenden Fall zur Emissionsminimierung ein 3-Wege Katalysator eingesetzt wird, der hohe Anforderungen an das Verhältnis von Treibstoff und Luft stellt, wird die Gemischregelung von einem zusätzlichen Regelventil im Gaspfad vorgenommen, sodass die Funktion des Venturimischers auf den reinen Mischvorgang beschränkt ist. Nach der Verbrennung werden die im Abgas befindlichen Schadstoffemissionen im 3-Wege Katalysator reduziert und oxidiert. Das heisse Abgas wird anschliessend über einen Rohrbündelwärmetauscher an die Umgebung abgeführt.

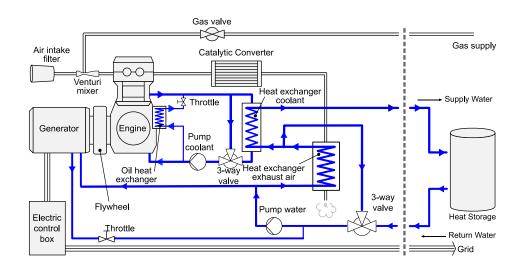


Abb. 6: Schema des Aladin mBHKW

Der hydraulische Aufbau besteht aus zwei gekoppelten Wasserkreisläufen, dem Kühlkreislauf für den Verbrennungsmotor und dem Heizkreislauf zur Erzeugung der Wärmeenergie. Die Kopplung erfolgt über einen Plattenwärmetauscher, der kreuzweise durchströmt wird. Dadurch wird Motorwärme aus dem Kühlkreislauf abgeführt und an den Heizkreislauf übertragen. Im Kühlkreis werden zudem ca. 8-10% des gesamten Volumenstroms über eine Verzweigung an einen Ölwärmetauscher geführt, um die Temperatur des Motoröls zu begrenzen. Weiterhin ist ein 3-Wege Ventil integriert, das es erlaubt, den Plattenwärmetauscher und damit die Kopplung mit dem Heizkreislauf zu regulieren. Dies ist insbesondere zum schnellen Aufwärmen des Motors zweckmässig, da bei geschlossenem 3-Wege Ventil keine Kühlung über den Heizkreis stattfindet und der Wärmeverlust auf die Wärmeabgabe der Verrohrung und des Motors an die Umgebung beschränkt bleibt. Sobald der Motor die nominelle Betriebstemperatur erreicht hat, wird das 3-Wege Ventil geöffnet, sodass die Anlage thermische Energie über den Heizkreislauf in Form einer Vorlauftemperatur mit einem Volumenstrom an den Energiepufferspeicher übertragen kann. Der Wiedereintritt des Heizwasser erfolgt am Ausgang des Energiepufferspeichers mit einer bestimmten Rücklauftemperatur. Nach Eintritt des Heizwasser am Rücklauf erfolgt eine Verzweigung zur Kühlung des Asynchrongenerators. Dies ist zweckmässig, da die Rücklauftemperatur im nominellen Betrieb die niedrigste Temperatur des Systems darstellt. Aus diesem Grund wird mit dieser Temperatur ebenfalls der spezifisch entwickelte Abgaswärmetauscher durchströmt. Dieser ist als Rohrbündelwärmetauscher ausgelegt und beinhaltet die Möglichkeit der Brennwertnutzung durch Kondensatabscheidung, um die thermische Effizienz der Anlage zu erhöhen. Zur Maximierung des Brennwerteffekts ist es daher zweckmässig, den Abgaswärmetauscher mit der niedrigst möglichen Temperatur, der Rücklauftemperatur, zu durchströmen. Analog zum Kühlkreislauf ist auch im Heizkreis ein 3-Wege Ventil integriert, mit dem die Kopplung der Kreisläufe über den Plattenwärmetauscher reguliert werden kann. Bei alleiniger Verwendung des 3-Wege Ventils im Kühlkeislauf wurden grosse Rückwirkungen auf die Motortemperatur und Vorlauftemperatur beim Umschaltvorgang nach Aufwärmen des Motors beobachtet. Unter Zuhilfenahme des 3-Wege Ventils im Heizkreis kann dieser Umschaltvorgang feiner abgestimmt werden und somit grosse Temperaturschwankungen vermieden werden (vgl. Kapitel 4.2.2). Eine detaillierte Übersicht des Anlagenaufbaus mit sämtlichen verbauten Komponenten ist mit Abb. 39 in Kapitel 9 gegeben.

Im Stationärzustand liefert die komplettinstrumentierte ETH Anlage (PT1) eine elektrische Leistung von 7.5 kW bei einer thermischen Leistung von 13.1 kW. Bei einer Brennstoffleistung von 23.4 kW entspricht



dies einem Gesamtwirkungsgrad von 88% Wobei der elektrische Wirkungsgrad 32% ausmacht. Die Emissionen im Stationärbetrieb, also bei warmem Katalysator, konnten mit der neuen Lambdaregelung auf <10 mg/Nm³ NOX, <35 mg/Nm³ CO und <5 mg/Nm³ THC (total hydro carbon) reduziert werden. Die in der Luftreinhalteverordnung (LRV) festgelegten Grenzwerte (NOX: 250 mg/Nm³, CO: 650 mg/Nm³) werden somit um ein Mehrfaches unterboten. Sogar die strengere Limitierung für NOX in der Stadt Zürich wird um ein 5-Faches unterschritten.



4 Steuerung und Regelung

Steuerungs- und Regelungssysteme sind heutzutage unersetzbar, wenn ein funktionsgerechter, sicherer Betrieb von Anlagen, wie dem Aladin II mBHKW, zu gewährleisten ist. In diesem Zusammenhang wurde von der ETH Zürich eine vollständige Anlagensteuerung programmiert und durch dedizierte Regelungssysteme ergänzt.

4.1 Steuerung

Bei der Entwicklung eines autonomen Betriebskonzept zur sicheren Steuerung der Prototypenanlagen wurde ein hierarchischer Ansatz verfolgt. Es besteht somit aus mehreren, miteinander koordinierten Funktionen, die von einem übergeordneten Entscheidungslevel aktiviert oder deaktiviert werden können. Auf diese Funktionsentscheidungen kann nicht manuell zugegriffen werden. Das Konzept ist auf Autonomie ausgelegt. Gleichwohl kann die globale Entscheidung des An- oder Abschaltens des mBHKW entweder automatisiert oder von einem Anwender erfolgen, sofern das korrekte Startsignal gesendet wird. Eine detaillierte Aufführung zu dieser Funktion der Betriebssteuerung ist in Kapitel 4.3 gegeben.

Die Betriebsart der mBHKW-Anlage ist so ausgelegt, dass sie einem chronologischen Kreislauf folgt, damit die unterschiedlichen Anforderungen Betreibungszustandes erfüllt werden können. In der Grundform besteht dieser Betreibungskreislauf aus den Modi "Anschalten", "Abschalten", "Betrieb" und "Ruhezustand". Letzterem kommt aus Sicherheitsgründen eine besondere Bedeutung zu. Obwohl die mBHKW Anlage nicht angeschaltet ist überwacht die Motorsteuerung als übergeordnete Sicherheitsinstitution mithilfe sämtlicher Sensorik bereits alle sicherheitsrelevanten Betriebsparameter. Werden Abweichungen spezifischer Kenngrössen vom Normzustand oder Komponentenausfälle, beispielsweise Sensorausfälle oder -fehler, erkannt, wird ein Start der Anlage unterbunden und die Anlage in einen "Fehlermodus" versetzt. Aus prozesstechnischen Gründen und unter Berücksichtigung der Anforderungen des nachfolgend detailliert erläuterten Sicherheitskonzepts ist zudem der Modus "Initialisierung" realisiert. Eine schematische Darstellung des gesamten Prozesskreislaufs ist Abb. 7 zu entnehmen.

Diese beschriebene "Mode-Control" bildet den zentralen Baustein zur Erfüllung aller koordinativen Funktionen, da das Betriebsmanagement diese Modus-Information an alle weiteren auf der Motorsteuerung implementierten Subsysteme und somit auch Funktionen distribuiert, wobei jedem Modus eindeutig definierte Handlungsweisungen zugrundliegen.



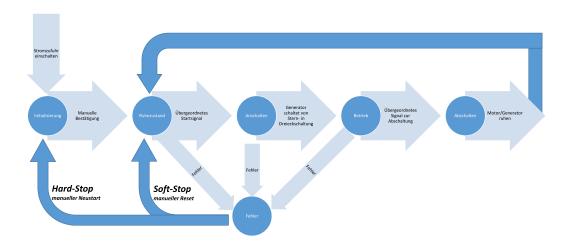


Abb. 7: Prozesskreislauf der Betriebssteuerung

Sicherheitskonzept

In prozesstechnischen Anlagen ist ein durchdachtes, auf Rückfallebenen basiertes Sicherheitskonzept unabdingbar, um einen sicheren Betrieb für Mensch und Maschine zu gewährleisten. Strukturell ist das entwickelte Sicherheitskonzept aus zusammenwirkenden Funktionsgruppen aufgebaut. Von grösster Bedeutung sind in diesem Kontext die Zustandsüberwachung, die redundante Fehlererkennung, die Klassifizierung von Fehlerfällen, sowie das Fehlermanagement, deren Funktionsweise im Folgenden grundlegend dargestellt wird.

Die Zustandsüberwachung oder auch Zustandsbeobachtung ist ein passives Instrument. In ihr werden sämtliche sicherheitsrelevanten Kenngrössen gebündelt. Kennwerte die nicht direkt über Sensoren beobachtbar sind, werden in der Zustandsüberwachung berechnet. Sofern möglich sind zudem Plausibilitätselemente eingeführt, die eine alternative Bestimmung von Kenngrössen erlauben. Die Bündelung zu überwachender Signale wird dauerhaft der Fehlererkennung weitergegeben.

Die Fehlererkennung bewertet die von der Überwachung aufgenommenen Signale und überprüft ob Fehlergrenzen überschritten wurden. Die Fehlererkennung bewertet somit jedes Signal anhand verschiedener Kriterien und löst bei Verletzung eines Sicherheitskriteriums einen Fehlerfall aus. Die Sicherheitskriterien sind für jede sicherheitskritische Grösse unterschiedlich. Sofern notwendig, können auch mehrere Kriterien für ein Signal gültig sein. Einige Beispiele für Sicherheitskriterien sind:

- Dauer der Abweichung
- Höhe der Abweichung
- Gradient der Abweichung pro Berechnungsschritt
- Nichtbestehen von Plausibilitätsüberprüfungen

Jedes Kriterium basiert auf definierten Eingriffsschwellen, die über den gesamten Projektzeitraum und anhand der Resultate aller Prototypenläufe fortlaufend verfeinert und angepasst wurden.

Die Fehlerklassifizierung bildet die Grundlage zur Priorisierung der Abweichungen und beeinflusst direkt das Verhalten im Fehlerfall. Diese Funktionsgruppe kann als Element verstanden werden, dass die



Bedeutung eines Fehlerfalls bestimmt. Es wird unterschieden in Fehlerfälle, die einen "Hard-Stop" und diejenigen, die einen "Soft-Stop" einleiten. In bedeutungsschweren Fehlerfällen, beispielsweise einem Bruch der Wellenverbindung zwischen Verbrennungsmotor und Generator, der einen rasanten Anstieg der Motordrehzahl zur Folge hätte, muss ein "Hard-Stop" eingeleitet werden und die Anlage ohne Verzögerung ausgeschaltet werden. Sämtliche Aktuatorik wird in einen Sicherheitsmodus versetzt. Beispielsweise bedeutet dies, dass die Zündung des Motors sofort abgeschaltet wird, während die Wasserpumpen auf maximale Leistung eingestellt werden, um ein Maximum an Wärmeabfuhr zu generieren und die Anlage schnellstmöglich abzukühlen. Erstere Massnahme resultiert jedoch in einem Restgasvolumen, dass unverbrannt durch den Verbrennungs- und Abgaspfad geleitet wird und dadurch lokal hohe Erhitzungen des Katalysators bewirken kann. Der "Hard-Stop" wird demnach nur in besonders schwerwiegenden Fällen eingeleitet. In dessen Folge verhindert eine Sicherheitsfunktion ein direktes Wiederanschalten der Anlage. Ein Neustart kann dann nur durch einen manuellen Neustart der Motorsteuerung erfolgen. Diese konzeptionelle Massnahme bewirkt, dass in diesem schwerwiegenden Fehlerfall eine bewusste Fehlerdiagnose und –bereinigung durch die für die Anlage verantwortliche Person erfolgen muss, bevor eine weitere Betreibung möglich ist.

Demgegenüber wurde der "Soft-Stop" konzeptualisiert, der als allgemeiner Fehlerfall dient. Der überwiegende Anteil der Fehlerfälle, beispielsweise Temperaturabweichungen, Druckverluste oder Sensorfehler, wird über dieses Verhalten realisiert. Grundsätzlich unterscheidet sich der "Soft-Stop" in zwei Gesichtspunkten vom "Hard-Stop". Zum einen kann, je nach Signal, ein Fehler für mehrere Berechnungsschritte bestehen, bevor der Fehlermodus aktiviert und die Anlage abgeschaltet wird. Somit wird verhindert, dass beispielsweise einmalige sensorische Schwankungen nicht direkt zu einem Abschalten der Anlage führen, sondern der weitere Fehlerverlauf entscheidend ist. Zum anderen ist das Verhalten im "Soft-Stop" mit einem erzwungenen Abschalten der Anlage vergleichbar. Die Aktuatorik wird nicht in einen Sicherheitsmodus versetzt. Stattdessen wird die Anlage ordnungsgemäss heruntergefahren und der jeweilige Fehlerfall zu Diagnosezwecken angezeigt. Diese Massnahme bewirkt beispielsweise, dass das im System vorhandene Sicherheitsventil beim Auslösen des Fehlers geschlossen, die Zündung aber noch wenige Zyklen weiter betrieben wird, sodass die Anlage ohne unverbranntes Restgas auslaufen kann und somit katalysatorseitige Schäden vermieden werden können.

Das Fehlermanagement als letztes Glied der Prozesskette schliesst den Kreislauf zum Betriebsmanagement und übernimmt die eigentliche Aktuierung des Fehlermodus. Das Verhalten der Anlage ist hierbei abhängig von der Bedeutung des Fehlerfalls, die von der Klassifizierung übergeben wird. Das System kann in einem Fehlerfall gemäss Abb. 7 nur durch eine manuelle Fehlerquittierung in den Ruhzustand überführt werden. Im Falle eines "Hard-Stops" muss, wie zuvor beschrieben, darüber hinaus ein Neustart der Motorsteuerung erfolgen. Im programmierten Fehlermanager werden die aktiven sowie die aufgetretenen Fehler zu Diagnosezwecken dokumentiert. Aus strukturellen Gründen ist jedoch immer ein spezifischer Fehler, genauer der Fehler mit der höchsten Priorität, massgebend für die Auslösung des Fehlermodus. Damit wird effektiv vermieden, dass mehrere Fehler auftreten und Unklarheiten bestehen, welcher dieser Fehler zu einem Abschalten der Anlage geführt hat. Der Fehlerspeicher wird dem Bediener über die eigens entwickelte Prüfstandssoftware ausgegeben, sodass eine gezielte, manuelle Fehlerdiagnose und –beseitigung ermöglicht wird.

Weitere Funktionseigenschaften

Die zuvor beschriebenen Konzepte bilden softwaretechnisch die Management-Ebene zur Betreibung der BHKW-Anlage ab. Dem untergeordnet ist eine Ebene mit speziell entwickelten Steuerungs- und Regelungssystemen, die betriebsbedingt an- und abgeschaltet werden können oder zustandsindividuelle Einstellungen hinterlegt haben. Beispiele hierfür sind:



- 1. Gasregelung zur Einstellung des Verbrennungsgemischs (Kapitel 4.2.1)
- 2. Regelung der hydraulischen Kreisläufe (Kapitel 4.2.2)
- 3. Dediziertes Kaltstartkonzept (Kapitel 4.2.2 und Kapitel 5)
- 4. Optimierung des Anlauf- und Abschaltverhaltens (Kapitel 4.3)
- 5. Steuerungstechnische Umsetzung von Wartungsintervallen (Kapitel 4.3)

Schaltschrank

Die zentrale Systemkomponente zur Umsetzung der zuvor angeführten Konzepte bildet der in Abb. 8 dargestellte Schaltschrank. Dieser wurde projektspezifisch geplant und gefertigt. Bei der Planung wurde fortlaufend auf die Umsetzbarkeit des entwickelten Sicherheitskonzepts geachtet. Alle Kommunikationswege entsprechen dem Industriestandard und sind somit zukunftsorientiert ausgelegt. Ferner wurden kosteneffiziente Bauteile und Komponenten verwendet, um eine Weiterentwicklung der Anlage in Richtung Serienanwendung zu vereinfachen. Mit der Ausnahme, dass zu Forschungszwecken weitaus mehr Temperatursensoren integriert sind als in Serienanwendungen nötig wären, ist der übrige Aufbau für eine seriennahe Fortentwicklung geeignet.





Abb. 8: Schaltkasten des Aladin II mBHKW

4.2 Regelung

Neben den notwendigen Steuerungssystemen (vgl. Kapitel 4.1) ist in heutigen technischen Anlagen eine Vielzahl von Regelungssystemen integriert. Diese haben den Vorteil, dass durch sensorische Überwachung schnell, gezielt und präzise auf Zustandsveränderung reagiert werden kann. Im Rahmen des Aladin II Projekts wurden mehrere Regelsysteme implementiert, die jeweils eine bestimmte Funktion erfüllen. Die zwei wichtigsten, die Regelung des Verbrennungsgemischs und die Regelung der Hydraulikkreisläufe, sind im Folgenden im Detail dargestellt.

4.2.1 Luftpfadregelung

Ein wesentliches Ziel des Projekts Aladin II besteht in der Minimierung der Emissionen. Dabei soll die Anlage nicht nur auf die Einhaltung bestehender Richtlinien, beispielsweise der in der Schweiz gültigen Luftreinhalteverordnung, sondern auf die technisch niedrigst möglichen Emissionen optimiert werden. Aus Vorstudien und dem Stand der Technik ist bekannt, dass ein Grossteil der Emissionen während des Kaltstartvorgangs emittiert wird. Die Optimierung dieses transienten Zustands ist besonders von der schnellen Einstellung der stationären Abgastemperatur abhängig, da die Temperatur des



integrierten 3-Wege-Katalysators den zentralen Baustein des optimalen Emissionsreduktionsfensters darstellt. Diese Temperatur ist wiederum entscheidend abhängig von der Temperatur des Motors. Direkter Einfluss kann somit über die schnelle Erwärmung des Motors und Kenngrössen, die direkt die Temperatur des Abgases beeinflussen genommen werden. Abb. 9 gibt einen Überblick über diese Einflussgrössen.

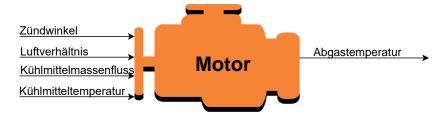


Abb. 9: Einflussgrössen auf die Abgastemperatur

Der Einfluss des Kühlmittelmassenfluss und die Kühlmitteltemperatur auf die Abgastemperatur sind im Vergleich mit dem Einfluss von Zündwinkel und Luftverhältnis vernachlässigbar und werden daher nicht weiter betrachtet. Ferner werden der Zündwinkel und das Luftverhältnis in ihrem Effekt auf die Kaltstartemissionen in Kapitel 5 detailliert betrachtet. Im Folgenden wird daher die entwickelte Luftpfadregelung vor dem Hintergrund des stationären Betriebs betrachtet.

Das Luftverhältnis λ ist definiert als Verhältnis der tatsächlichen Luftmasse zu der Luftmasse, die für eine stöchiometrische Verbrennung notwendig ist (Fl. 1).

$$\lambda = \frac{m_{L,tats}}{m_{L,stoich}}$$
 Fl. 1

Gemäss Abb. 10 wirken sich Variationen des Luftverhältnisses signifikant auf die Emittierung von Schadstoffen aus.

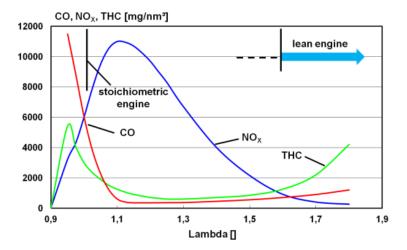


Abb. 10: Emissionen in Abhängigkeit des Luftverhältnisses λ

Zum Zweck der Emissionsminimierung wird im Rahmen des Aladin II mBHKW ein 3-Wege Katalysator eingesetzt. Diese Komponente erfordert ein Luftverhältnis in einem engen Bereich um $\lambda=1$. Diese Bedingung ist unter allen Zuständen, Kaltstart sowie stationärer Zustand, sicherzustellen, um den Katalysator nicht zu beschädigen. Die in diesem Zusammenhang entwickelte λ -Regelung erfüllt diese Anforderungen über den gesamten Lebenszyklus der mBHKW-Anlage, da sowohl Veränderungen des



Verbrennungsvorgangs im Motor, als auch Alterungserscheinungen und damit Veränderungen des Katalysatorverhaltens ausgeregelt werden können. Abb. 11 gibt den schematischen Aufbau der Reglerstruktur wieder.

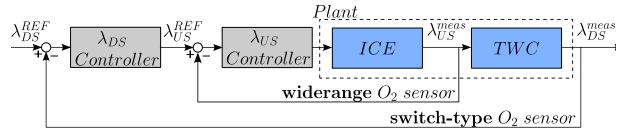


Abb. 11: Struktur der Lambdaregelung

Das Regelungsprinzip folgt einer kaskadierten Struktur und beruht zunächst auf einer stabilen Regelung des Luftverhältnisses vor dem Katalysator. Als Messsonde wird eine Breitbandsonde eingesetzt, die den relevanten Messbereich des Luftverhältnisses abdeckt. Ein PI-Regler wurde so aufgebaut und abgestimmt, dass diese Abweichung des aktuell von der Sonde gemessenen λ -Wertes mit dem gewünschten λ -Sollwert in ausreichender und technisch möglicher Genauigkeit minimiert wird. Abb. 12 zeigt die Messergebnisse unter Einsatz dieses "inneren" Regelkreislaufs. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind zwei verschiedene Auflösungen dargestellt.

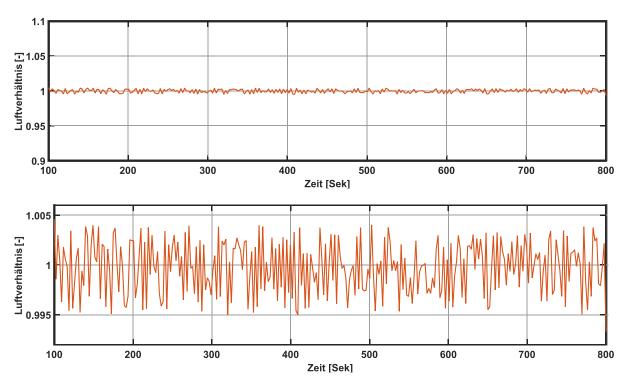


Abb. 12: Luftverhältnis vor dem Katalysator vor dem Katalysator in zwei Auflösungsgraden

Es zeigt sich, dass mit der entwickelten Regelung das Luftverhältnis vor dem Katalysator sehr genau eingeregelt werden kann. Die in Abb. 12 auftretenden Schwankungen unterliegen den üblichen Abweichungen, die durch kleine Variationen der innermotorischen Verbrennung und durch die Genauigkeit der Auswertungselektronik, deren Signale als analoge Spannungen an die Motorsteuerung und damit die Regelung übertragen werden, auftreten. Ohne nachgeschaltete Filterung ergeben sich



Schwankungen im Bereich von 1%. Mit nachgeschalteter Filterung können diese Schwankungen weiter reduziert werden. Bei jeder Filterung ist jedoch zu beachten, dass Veränderungen der Dynamik auftreten, die sich auf die Qualität des Reglers auswirken. In der Lambdaregelung des Aladin II mBHKW findet daher nur eine sehr konservative Filterung statt, sodass die Qualität des Lambdareglers hauptsächlich durch die Reglerauslegung bestimmt bleibt.

Wie zuvor erwähnt hat der Katalysator einen signifikanten Einfluss auf die Schadstoffemissionen. Eine Regelung des Luftverhältnisses vor dem Katalysator kann somit als notwendige Regelung betrachtet werden. Um die Konvertierungsvorgänge und insbesondere den Alterungsvorgang des Katalysators zu berücksichtigen, ist die Lambdaregelung gemäss Abb. 11 um eine Messsonde nach dem Katalysator erweitert. Diese λ-Sonde ist als Sprungsonde ausgeführt und wird gemeinhin als Diagnosesonde bezeichnet, da sich aus dem Vergleich beider Sondensignale Rückschlüsse auf die Funktionsfähigkeit des Katalysators ableiten lassen. Mit Hilfe der Sprungsonde können somit Verschleisserscheinungen und weitere Einflüsse auf die Konvertierungsqualität des Katalysators berücksichtigt werden. Ferner sind Breitbandsonden, wie sie vor dem Katalysator eingesetzt wird, anfällig für Sensordrift. Mithilfe der Sprungsonde kann dieser zeitliche Drift kompensiert werden.

Regelungstechnisch bildet das von der Sprungsonde gemessene Luftverhältnis nach dem Katalysator die für den Emissionsausstoss wichtigste Kenngrösse. Ein weiterer PI-Regler stellt sicher, dass dieses effektive Luftverhältnis emissionsoptimal eingeregelt wird. Durch die Verwendung des äusseren Regelkreises mit der Sprungsonde nach dem Katalysator wird nun dem inneren Regelkreis vor dem Katalysator statt eines konstanten λ -Sollwerts ein vom äusseren Regelkreis bestimmter, dynamischer λ -Sollwert übergeben.

Die damit verbundenen, häufigen Sollwertsprünge im Bereich von < 1% sind in der Feinauslegung des inneren PI-Reglers berücksichtigt. Eine Systemidentifikation hat ergeben, dass Änderungen der Gasregelventilposition aufgrund des Katalysatoreinflusses vor dem Katalysator signifikant früher als nach dem Katalysator zu detektieren sind. Der kaskadierte Regler berücksichtigt dieses Verhalten indem der innere Regelkreis mit einer schnelleren Dynamik ausgelegt ist, als der äussere Regelkreis. Damit ist die Häufigkeit der berechneten Sollwertsprünge begrenzt und der innere PI-Regler kann diesen durch seine schnellere Dynamik problemlos folgen. Die Folge ist, dass der Katalysator nicht zu einem stark dynamischen Verhalten angeregt wird, sondern aus Sicht des einströmenden Abgasgemischs quasi-stationär betrieben wird. Resultate zu den Schadstoffemissionen im stationären Betrieb sowie auch unter Kaltstartbedinungen unter Verwendung der entwickelten Lambdaregelung sind Kapitel 5.4 dargestellt.

4.2.2 Regelung des Hydrauliksystems

Der Regelung der Wasserkreisläufe des Aladin mBHKWs kommt eine zentrale Bedeutung zu. Besonders die Anforderungen an eine schnelle Bereitstellung thermischer Leistung, möglichst kurze Aufwärmzeiten des Schmieröls sowie eine stabile und funktionssichere Temperaturregelung an der Schnittstelle zum Wärmespeicher machen eine robuste und qualitativ hochwertige Regelung zur Grundvoraussetzung. Zu dokumentarischen Zwecken wird im Folgenden zwischen der Regelung im stationären Betrieb und der Regelung zur Optimierung des Aufwärmverhaltens des BHKW unterschieden. Dies ist zweckmässig, da diese zwei Betriebszustände unterschiedliche Anforderungen an die Regelung stellen. Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit und Einheitlichkeit werden an dieser Stelle die Motorausgangstemperatur T12, die Heizkreisvorlauftemperatur T24 und die Temperatur des Schmieröls in der Ölwanne T01 als relevante Systemtemperaturen definiert (vgl. Abb. 39 im Anhang).



Stationärer Betrieb

Der stationäre Betrieb des Wasserkreislaufs ist dadurch gekennzeichnet, dass sich alle relevanten Systemtemperaturen der Wasserkreisläufe nur noch sehr langsam, also mit einer grossen Zeitkonstante verändern. Dies macht den Einsatz einer klassischen PI-Reglerstruktur zweckmässig, da diese Regler je nach Abstimmung eine gute Schnelligkeit und Genauigkeit bei der Minimierung der Abweichungen von einem Temperatursollwert erreichen können. Der Einsatz von modernen, ressourcenintensiven Methoden wurde im Kontext des stationären Regelbetriebs, besonders aufgrund der im Vergleich langsamen Dynamik von Temperaturänderungen, daher als nicht zweckgemäss bewertet.

Im Zusammenhang mit dem Aufbau der Anlagen im parallelen P&D Projekt (SI/501300-1) [2] wurde zunächst ein auf dem ETH Prüfstand entwickelter, simpler PI-Regler implementiert. Der verfolgte Einsatzzweck war zunächst einzig auf einen sicheren, robusten Betrieb der Anlage ausgelegt, um das gesamte Blockheizkraftwerkverhalten analysieren und gegebenenfalls optimieren zu können. Diese erste Reglerstufe bestand aus einem PI-Regler, dessen Ausgabe ein Stellsignal für die Umwälzpumpe des Heizkreises (vgl. Abb. 6) war. Als Regelgrösse wurde zunächst die Motorausgangstemperatur T12 und nicht die Vorlauftemperatur T24 definiert. Diese Entscheidung begründet sich auf dem Ziel, das System zunächst sicher, aber mit so wenigen Randbedingungen wie möglich zu betreiben. Damit wurde sichergestellt, dass eine umfassende und möglichst wenig beeinflusste Analyse des Systemverhaltens vorgenommen werden kann. Insbesondere die gegenseitige Beeinflussung Motorausgangstemperatur T12, Vorlauftemperatur T24 und deren Auswirkungen auf Temperaturdifferenz über dem Motor sowie die Schmieröltemperatur in der Ölwanne T01 konnte so eingehend untersucht werden. Die Umwälzpumpe P11 wurde in diesem Zustand nicht geregelt, sondern konstant auf maximale Drehzahl eingestellt, um bei der Reglerabstimmung und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Temperaturdifferenz keine kritischen Zustände zu erzeugen (Fehlergrenze $\Delta \vartheta_{\text{Motor}} = 10^{\circ}\text{C}$).

Die Qualität dieses vereinfachten Reglerkonzepts war ausreichend, um es als Grundlage für die Inbetriebnahme aller weiteren Blockheizkraftwerke einzusetzen. Wie in Abb. 13 dargestellt, konnte das Über- bzw. Unterschwingen auf einen sehr engen Bereich von ± 0.8°C um den Sollwert beschränkt werden. Die Anregelzeit bei Sprüngen des Sollwerts von ΔT_soll > 5°C war in der implementierten Abstimmung mit t₉₀ = 9.47 s sehr hoch. Da diese Abstimmung jedoch einen stabilen Betrieb ermöglichte und ferner die Sollwertsprünge im stationären Zustand auf ∆T_soll_{max} < 1.6°C begrenzt waren, wurde diese Struktur als geeignet für den nachfolgenden Funktions- und Inbetriebnahmeprozess bewertet. Der grösste prozesstechnische Vorteil lag darin, dass nur die Motorausgangstemperatur T12 aus sicherheitstechnischen Überlegungen begrenzt wurde. Sämtliche weiteren Temperaturen waren ein Resultat des hydraulischen Anlagenverhaltens, sodass insbesondere bei den Funktionstests und der Inbetriebnahme am jeweiligen Bestimmungsort schnelle Vergleiche mit vorherigen Inbetriebnahmen aus anderen Anlagen möglich waren. Dadurch konnten Unterschiede im hydraulischen Verhalten schnell und eindeutig einer bestimmten Ursache zugeordnet und entsprechende Massnahmen zur Angleichung vorgenommen werden. Exemplarisch sei an dieser Stelle die Einstellung von Drosseln im Heizkreis genannt, mit denen das thermische Verhalten der Anlagen angeglichen wurde, sodass ein späterer datenbasierter Vergleich möglich ist.

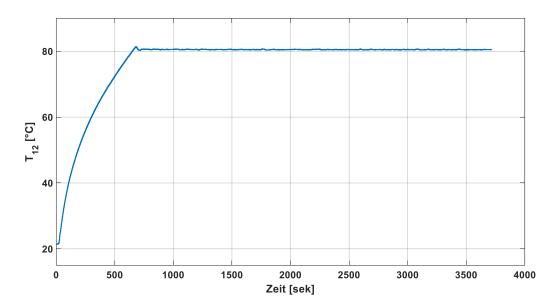


Abb. 13: Inbetriebnahmeregelung (Regelung auf eine Motorausgangstemperatur T12 = 80.5°C)

Zur Effizienzsteigerung und einer erhöhten Regelqualität unter Ausnutzung der aktuatorischen Möglichkeiten, wurde die Wasserkreislaufregelung konzeptionell dahingehend überarbeitet, dass die Umwälzpumpe P21 im Heizkreis als Aktuator für die Regelung der Vorlauftemperatur für den Wärmespeicher eingesetzt wird. Ferner wurde die Umwälzpumpe P11 regelungstechnisch so eingebunden, dass sie als Aktuator für die Regelung der Temperaturdifferenz über dem Motor ($\Delta\vartheta_{\text{Motor_Soll}} = 5^{\circ}\text{C}$) fungiert. Zum Zweck der Systemanalyse und insbesondere der Analyse des Systemverhaltens des eingebundenen Regelkugelhahns V21 wurde das Blockheizkraftwerk simulativ in der Softwareumgebung Matlab/Simulink® umgesetzt. Eine umfassende Messreihenaufnahme und anschliessende Identifikation sämtlicher Systemkomponenten zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für den stationären Zustand. Basierend auf diesem Modell wurde eine Systemanalyse durchgeführt, um den Grad der Auswirkungen von Variationen der Aktuator-Stellsignale auf das Systemverhalten zu ermitteln.

Die Analyse bestätigte die Annahme, dass zur Regelung der Vorlauftemperatur T24 die Pumpe P21 im Heizkreis der geeignete Aktuator, während die Pumpe P11 zur Regelung der Temperaturdifferenz über dem Motor geeignet ist. Entsprechend wurde das aufgebaut Model zur Reglerauslegung und Optimierung verwendet. Wie zuvor erwähnt stellt für den stationären Zustand ein PI-Regler die geeignete Reglerstruktur zum Auflösen des Zielkonflikts zwischen Ansprechverhalten und Genauigkeit dar. Der Regler wurde anschliessend simulativ optimiert und im Prüfstandsversuch implementiert, getestet und optimiert. Als Resultat weisen sowohl die Regelung der Temperaturdifferenz über dem Motor, als auch die Regelung der Vorlauftemperatur T24 Abweichungen von ihrem jeweiligen Sollwert von < 0.5°C auf (Abb. 14). Zu beachten ist, dass T12 nun nicht mehr als Regelgrösse verwendet wird, sondern eine Folge der Wärmeabfuhr über den Plattenwärmetauscher durch die Regelung von T24 darstellt. Der in Abb. 14 erkennbare Unterschied zwischen T12 und T24 korrespondiert, unter Berücksichtigung der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen hydraulischen Massenströme, mit einer Wärmeabfuhr von 1kW aus dem Motorkühlkreislauf (Laufzeit = 1h)



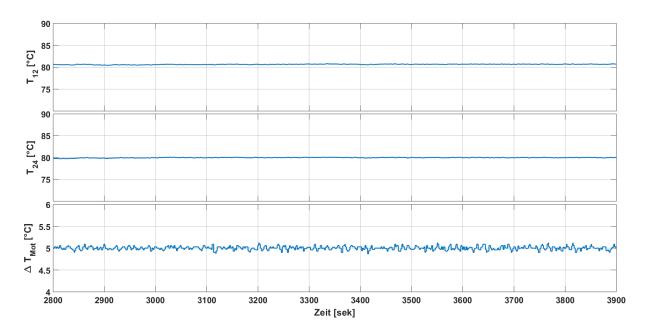


Abb. 14: Hydraulikregelung im stationären Betrieb (1. $\vartheta_{24_Soll} = 80^{\circ}\text{C}$, 2. $\Delta\vartheta_{\text{Motor,Soll}} = 5^{\circ}\text{C}$)

Aufwärmverhalten

Neben der Optimierung des Emissionsverhalten liegt ein weiterer Schwerpunkt des Projekts Aladin auf der Optimierung der Anlageneffizienz. Ebenso wie bei dem Emissionsverhalten stellt auch unter diesem Gesichtspunkt der Kaltstart, im Folgenden als Aufwärmvorgang bezeichnet, besondere Anforderungen an die Güte der Wasserkreislaufregelung. Eine Verkürzung der Aufwärmzeit durch ein geeignetes Regelungskonzept resultiert in einer Vielzahl von Vorteilen. Der signifikanteste Vorteil bei einer schnellen Motor- und Schmierölerwärmung ist die Verkleinerung der Phase eines ineffizienten Motorbetriebs. Insbesondere das Schmieröl kann seine gewünschten hydraulischen Eigenschaften erst bei Betriebstemperaturen von 90°C ≤ T01 < 100°C entfalten. Ferner ist das Erreichen des Sollwerts für die Vorlauftemperatur T24 von hoher systemischer Bedeutung, da erst ab diesem Ereignis die Produktion von thermischer Leistung beginnt.

Als Zielgrössen der Optimierung und zur Bewertung des Aufwärmverhaltens wurden die folgenden Systemgrössen festgelegt:

- Aufwärmen der Kühlwassertemperatur am Motorausgang T12 auf T12 ≥ 80°C
- 2. Aufwärmen der Heizkreisvorlauftemperatur T24 auf T24 ≥ 80°C
- Temperatur der Schmieröltemperatur in der Ölwanne T01

Die Temperaturdifferenz des Kühlwassers zwischen Motoraus- und -eintritt bleibt auch für den Aufwärmvorgang eine wichtige Regelgrösse und ist daher auf einen Sollwert von $\Delta\vartheta_{\text{Mot}}$ = 5°C zu regeln.

Die dominante Systemgrösse für die Aufwärmphase ist die Motortemperatur T12. Mit einer Systemanalyse kann gezeigt werden, dass durch die grosse thermische Trägheit des Abgaswärmetauschers die Vorlauftemperatur T24 der Motorausgangstemperatur T12 in sämtlichen Phasen des Aufwärmprozesses folgt. Der Wärmeeintrag durch die Kühlung des heissen Abgases im Abgaswärmetauscher ist vorhanden, aber gering im Vergleich mit dem der Wärmeabfuhr aus dem Kühlkreislauf und der damit verbundenen Wärmeaufnahme im Heizkreislauf. Dieser Zusammenhang gilt qualitativ ebenso für die Öltemperatur T01. In der Folge wurde bei allen untersuchten Konzepten, der schnellen Erhöhung der Motorausgangstemperatur T12 die oberste Priorität zugewiesen.



Die Vorlauftemperatur T24 ist die bestimmende Systemgrösse für den Start der Produktion von thermischer Energie. Erst nach Erreichen des Sollwerts setzt die stationäre Regelung der Heizkreispumpe P21 ein und produziert einen Volumenstrom an Heizwasser, der für die Produktion von thermischer Energie massgeblich ist. Ein dauerhafter Betrieb der Pumpe P21 wurde in Prüfstandsversuchen untersucht und hat sich als durchweg nachteilig erwiesen. Der Grund dafür besteht in der Kopplung des Heizkreises mit dem Kühlkreislauf des Motors über den Plattenwärmetauscher. Je höher der durch die Pumpe P21 eingestellte Volumenstrom, desto mehr Wärme wird aus dem Kühlkreislauf des Motors abgeführt. Dies ist im Kontext der Regelung des stationären Zustands ein positiver Effekt, hinsichtlich des Ziels einer verkürzten Aufwärmphase des Motors jedoch negativ, da der Motor effektiv gekühlt und damit ein Erwärmen aktiv verzögert wird. Um diesen Effekt zu unterbinden, kann für den Aufwärmvorgang eine Aktuierung der 3-Wege-Ventile V13 und V21 erfolgen. Damit kann der Plattenwärmetauscher umgegangen werden und ein Entkopplung beider Wasserkreisläufe erfolgen. Somit kann zum einen ein schnellmögliches Aufwärmen des Motors sichergestellt werden, da ausser der Wärmeabgabe an die Umgebung keine Rückkühlung stattfindet. Zum anderen kann die Pumpe im Heizkreis dauerhaft betrieben werden, was sicher positiv auf die Vermischung, besonders im Abgaswärmetauscher auswirkt. Ohne die 3-Wege Ventile müsste die Pumpe P21 vor den Aufwärmvorgang ausgeschaltet werden. Die ist zwar technisch möglich, erzeugt jedoch eindeutige Nachteile in Form einer starken Rückkühlung der Motortemperatur sobald die Pumpe zugeschaltet wird. Durch die beiden 3-Wege Ventile kann somit nicht nur eine schnelle Erwärmung erfolgen, auch der Übergang zum stationären Betrieb geht mit eindeutig geringeren Schwankungen der Zieltemperaturen einher.

Die Erwärmung des Schmieröls T01 unterliegt einer direkten Abhängigkeit der Motortemperatur T12. Es erscheint zunächst nicht sinnvoll diese als Zielgrösse zur Optimierung des Aufwärmprozesses einzubinden. Die entwickelten und nachfolgend dokumentierten Aufwärmkonzepte folgen jedoch einem hierarchischen Prinzip. Wenn demnach beide Schwellwerte für die Motorausgangstemperatur T12 und die Vorlauftemperatur T24 erreicht wurden, wird in zwei Konzepten eine dritte Priorität auf ein schnelleres Erwärmen der Öltemperatur T01 gelegt. Es ist somit zweckmässig, die Öltemperatur T01 zu den Bewertungsgrössen hinzuzunehmen und damit in den Vergleich der Konzeptvarianten einzubinden.

Tab. 1 gibt eine Übersicht über die im Rahmen der Kaltstartoptimierung untersuchten Konzepte. Temperaturangaben bedeuten in diesem Zusammenhang eine Regelung mit dem entsprechenden Aktuator auf den angegebenen Sollwert, während dimensionslose Werte die normierte Stellposition des jeweiligen Aktuators mit u_i = [0...1] und i \in {P11, V13, P21, V21} kennzeichnen. Als Referenz zur Gegenüberstellung der verschiedenen Konzepte dient der nominale Betriebszustand. Dieser ist gekennzeichnet durch die beiden Regelungen zum einen auf die Temperaturdifferenz zwischen Motorund Motoreinlass, sowie die Vorlauftemperatur T24 mit einem Sollwert von T24 = 80°C. Ferner befinden sich die Regelventile V13 und V21 im stationären Zustand im Zustand "Offen", um die maximale thermische Leistung dem Energiepufferspeicher zuzuführen.



Konzept	P11	V13	P21	V21	Zündwinkel
Referenz	$\Delta T_{Motor} = 5^{\circ}C$	0 (offen)	1. 0.15 (Minimum) 2. T24 = 80°C	0 (offen)	30° KW
Α	$\Delta T_{Motor} = 5^{\circ}C$	0 (offen)	1. 0.15 (Minimum) 2. T24 = 80°C	0 (offen)	30° KW
В	$\Delta T_{Motor} = 5^{\circ}C$	0 (offen)	1. 0.15 (Minimum) 2. T24 = 80°C	0.5	30° KW
С	$\Delta T_{Motor} = 5^{\circ}C$	0 (offen)	1. 0.15 (Minimum) 2. T24 = 80°C	1 → 0	30° KW
D	$\Delta T_{Motor} = 5^{\circ}C$	1 → 0	1. 0.15 (Minimum) 2. T24 = 80°C	0.3	30° KW
E	$\Delta T_{Motor} = 5^{\circ}C$	0.49	T24 = 80°C	0.3	30° KW
F	$\Delta T_{Motor} = 5^{\circ}C$	0.55	T24 = 80°C	0.3	30° KW
G	$\Delta T_{Motor} = 5^{\circ}C$	1 → 0	T24 = 80°C	1 → 0	30° KW

Tab. 1: Aufstellung der untersuchten Aufwärmkonzepte

Systemgrösse	T12	T24	T01
Vergleichswert t _{Dauer} bis	≥ 80°C	≥ 80°C	≥ 80°C

Tab. 2: Vergleichsgrössen zur Bewertung der Aufwärmkonzepte

Zunächst wurde gemäss des ausgearbeiteten Hydraulikkonzepts eine Untersuchungsreihe der Konzepte A-D durchgeführt. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass die ursprüngliche Hydraulikplanung beinhaltete, dass der Regelkugelhahn V21 dazu verwendet werden kann, um den Aufwärmvorgang zu beschleunigen, da dieser die aktuelle Vorlauftemperatur mit einem variablen Mischverhältnis an das System zurückkoppelt und somit ganz oder teilweise unabhängig von einer "kalten" Rücklauftemperatur T25 macht. Die Konzepte A-C unterscheiden sich einzig in der Stellposition dieses Regelkugelhahns, wobei zu berücksichtigen ist, dass Konzept C auf einer stufenweisen Veränderung der Stellposition in Abhängigkeit der Motorausgangstemperatur und der Vorlauftemperatur beruht, während die Konzepte A und B wie der Referenzfall mit einer konstanten Ventilstellung durchgeführt wurden. Die Pumpe P21 wurde auf ihre Minimaldrehzahl eingestellt, um eine konstante Durchmischung im Heizkreis während des Aufwärmens zu erzielen. Nach Erreichen der Vorlauftemperatur schaltet die Pumpe P21 in den Regelungsbetrieb mit dem Sollwert T24_{Soll} = 80°C.

Die Ergebnisse in Abb. 15 zeigen, dass der Regelkugelhahn V21 keinen signifikanten Einfluss auf ein schnelleres Aufwärmverhalten des Blockheizkraftwerks besitzt. Dieses Resultat ist hauptsächlich auf die grosse Trägheit des Abgaswärmetauschers zurückzuführen. Durch den heizkreisseitigen, minimalen Durchfluss über den Plattenwärmetauscher bei offenen Ventile V13 und V21 wird der Motor effektiv gekühlt und somit ein Aufwärmen verzögert. Stellungsänderungen des Regelkugelhahns wirken sich zwar auf die Systemtemperaturen aus, allerdings ist durch die genannte Trägheit des Abgaswärmetauschers die Zeitkonstante dieser Änderungen so gross, dass positive Effekte in der Phase des Aufwärmens nicht zu erzielen sind. In Unterversuchen wurde darüber hinaus untersucht, ob durch einen grösseren Durchfluss durch eine erhöhte Pumpenstellung positive Effekte generiert werden können. Dies ist jedoch nicht der Fall, da ebenfalls durch die hohe Trägheit des Wärmetauschers der Wärmeübergang vom heissen Abgas auf das Wasser im Heizkreis nur zu sehr geringen Erhöhungen der Vorlauftemperatur führen. Weitaus grösser als diese geringe Erwärmung geht die Kühlung des Motors durch einen erhöhten Durchfluss im Heizkreis ein. Ein Aufwärmen des Motors findet schon bei geringen Erhöhungen des Durchflusses nicht mehr statt. In der Folge nimmt demnach auch die Vorlauftemperatur T24 nicht zu. Daher wurde sich im weiteren Verlauf auf die in Tab. 1 dargestellten Konzeptvarianten mit einer minimalen Pumpendrehzahl festgelegt.

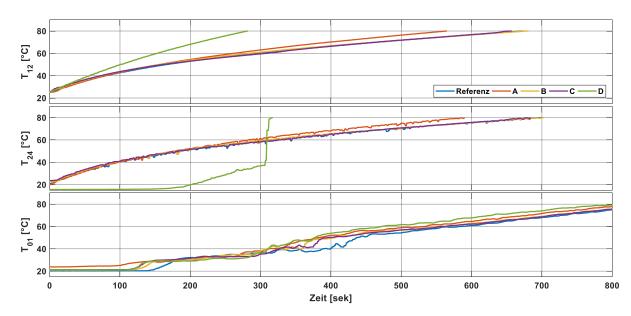


Abb. 15: Ergebnisse der Aufwärmkonzepte A-D

Anhand der Ergebnisse der Konzeptversuche A-C lässt sich damit festhalten, dass zum einen der Regelkugelhahn V21 keine Verbesserung bezüglich einer schnelleren Aufwärmzeit darstellt und damit insbesondere für die Feinabstimmung beim Übergang zum stationären Betrieb verwendet wird. Zum anderen ist bestätigt, dass eine schnelle Erwärmung des Motors die Grundlage für ein beschleunigtes Aufwärmen ist. Um den Einfluss des Motoraufwärmverhaltens genauer zu untersuchen wurde darüber hinaus das Konzept D entwickelt. Dieses beruht auf einer vollständigen Schliessung des Ventils V13 bis T12 = 80°C erreicht ist. Damit ist sichergestellt, dass während des Aufwärmprozesses der Motor nicht über den Plattenwärmetauscher gekühlt wird. Abb. 15 zeigt deutlich den positiven Einfluss dieses Konzepts auf die Erwärmung der Motortemperatur. Effektiv kann durch diese Massnahme die Aufwärmzeit des Motors um 50% verkürzt werden. Gegenüber dem Referenzfall ist diese Differenz noch grösser (vgl. Tab. 3 am Ende des Abschnitts). Dieser Auswirkung zeigt sich ebenso in einem deutlich erhöhten Temperaturgradienten für das Schmieröl und ist damit vom Gesamtverhalten her sehr positiv zu bewerten.

Ein wesentlicher Nachteil des Konzepts D liegt jedoch in der Übergangsphase zwischen Aufwärmen und stationärem Zustand. Das Regelventil V13 hat eine stark nichtlineare Kennlinie (Abb. 16). Für die Übergangsphase bedeutet dies, dass nach abgeschlossener Motorerwärmung eine Öffnung des Ventils V13 erfolgt um die Vorlauftemperatur T24 zu erhöhen. Durch die nichtlineare Kennlinie und unter Berücksichtigung der langsamen Dynamik des Regelventils, 35sek für eine volle Öffnung, bewirkt dies einen sprunghaften Anstieg der Vorlauftemperatur T24. Insbesondere eine Abkühlung der Motortemperatur ist durch den Heizkreisvolumenstrom im Anschluss nicht zu vermeiden und führt in der Folge zu einer erneuten Abkühlung der Vorlauftemperatur. Anschliessend geht das System in einen Schwingungsvorgang der beiden Temperaturen T12 und T24 über, der nicht zielführen für die gewünschte, konstante Produktion thermischer Leistung ist. Die Regelung im stationären Zustand stabilisiert diese Schwingung erst nach mehreren Minuten. Im Ergebnis zeigt sich demnach keine Verkürzung der Aufwärmzeit, wenn ein stabiler Betrieb bei T24~80°C als Kriterium zugrunde gelegt wird.

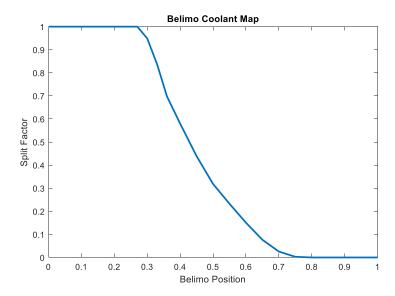


Abb. 16: Kennlinie des 3-Wege Ventils V13

Die weiteren Konzepte E-G fokussieren sich vor diesem Hintergrund auf die Abstimmung der beiden Regelkugelhähne. Konzept E und F sind hier durch eine konstante bzw. quasikonstante Position des Regelkugelhahns V13 gekennzeichnet, während Konzept G eine feine, schrittweise Verstellung der Stellposition in Abhängig der Motorausgangstemperatur T12, Vorlauftemperatur T24 und der Schmieröltemperatur T01 vornimmt.

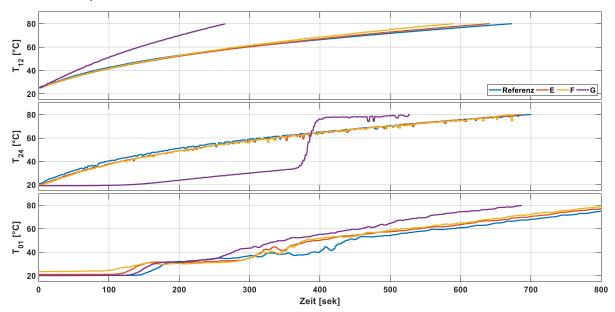


Abb. 17: Ergebnisse der Aufwärmkonzepte E-G

Die Ergebnisse der Konzeptuntersuchungen sind in Abb. 17 gegenüber dem Referenzfall aufgetragen. Es zeigt sich, dass durch die Abstimmung der Regelkugelhähne V13 und V21 eine Veränderung im Aufwärmverhalten auftritt. Bei Konzept G, bei dem V13 und V21 eingangs voll geschlossen sind und somit keine Wärme aus dem Kühlkreislauf abgeführt wird, zeigt sich eine kurze motorseitige Aufwärmzeit, die schon in Konzept D erkennbar ist. Je nach Anfangsbedingung und Isolierung kann der Verbrennungsmotor demnach in einem Bereich von 4.5min – 5min aufgewärmt werden, was einer Verkürzung um 58% gegenüber dem Referenzfall entspricht. Die Herausforderung in der 28/72



Übergangsphase zum stationären Betrieb wird bei Konzept mit mehreren Massnahmen begegnet. Zum einen wird die Motortemperatur T12 kurz vor Erreichen der Solltemperatur mithilfe der feinabgestimmten Regelkugelhähne V13 und V21 nur langsam weiter erwärmt, um ein deutliches Überschiessen zu verhindern. Ferner wird die Motorausgangstemperatur über den ursprünglichen Zielwert von T12 = 80°C hinaus erwärmt wir, sodass trotz des Temperaturabfalls, der durch die Abstimmung von V13 und V21 sehr viel kleiner ausfällt, in der Übergangsphase dauerhaft eine Temperatur von T12 > 80°C vorherrscht. Dies ist notwendig, um den Anstieg der Vorlauftemperatur T24 nicht zu beeinträchtigen, da eine Temperatur von T12 < 80°C durch die zunehmende Kopplung bei diesen beiden Temperaturen bei sich öffnenden Ventilen ein Erreichen des Zielwerts von T24 = 80°C verzögern würde. Als Vergleich zeigen die Ergebnisse der Konzepte E und F das Aufwärmverhalten bei konstanten Stellpositionen von V13. Es zeigt sich, dass der Aufwärmvorgang des Motors durch diese Konzepte im Vergleich zu Konzept G deutlich verzögert wird, in der Folge jedoch die Vorlauftemperatur T24 schon während des Aufheizvorgangs mit ansteigt, was bei Konzept G aufgrund der Entkopplung von T24 von der Motortemperatur T12 vermieden wird. Auf der anderen Seite bewirkt Konzept G, dass der Motor frühzeitig bei höheren Temperaturen betrieben wird, was sich sehr positiv auf die Erwärmung des Schmieröls auswirkt (vgl. Abb. 17 und Tab. 3).

Eine Optimierung des Aufwärmverhaltens beinhaltet somit grosses Potential zur Erhöhung der Anlageneffizienz. Insbesondere die Einbringung der 3-Wege Ventile V13 und V21 bewirken eine signifikante Erhöhung der Flexibilität zur schnelleren Produktion von thermischer Energie. Einzig eine Verkleinerung der thermischen Trägheit des Abgaswärmetauschers könnte mit dedizierten Hydraulikregelungen eine weitere Verkürzung der Aufwärmzeit bewirken. Da dieser Wärmetauscher spezifisch für die Anforderungen im Kontext von Blockheizkraftwerken ausgelegt wurde, sind jedoch an anderer Stelle mögliche nachteilige Auswirkungen bei einer deutlichen Verkleinerung zu erwarten. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von 3-Wege Ventilen mit einer weniger nichtlinearen Kennlinie oder einer feineren Schrittauflösung. Es ist zu vermuten, dass diese Massnahme bewirken würde, dass die Vorlauftemperatur von Konzept G in seiner Aufwärmzeit näher an den Spitzenwert von Konzept D heranreichen würde, ohne die bei Konzept D verbundenen starken Schwingungsvorgänge zu induzieren. Die damit verbundene, zu erwartende Steigerung der Kosten wäre anschliessend im Rahmen einer Kosten-Nutzen Analyse zu bewerten.

Konzept	T12 > 80°C	T24 > 80°C	T01 > 80°C	
Referenz	11.22	11.66	15.28	
Α	9.42	9.83	14.23	
В	11.35	11.72	14.80	
С	10.95	11.40	14.77	
D	4.70	5.28	13.57	
Е	9.63	10.51	14.25	
F	9.23	10.25	13.76	
G	4.41	8.8	11.45	

Dauer in Minuten bis

Tab. 3: Aufstellung der Aufwärmzeiten für die untersuchten Konzeptvarianten

4.3 Betriebskonzept

Für das Aladin II mBHKW wurde über die Betriebssteuerung hinaus ein Betriebskonzept entwickelt. Der Entwicklungsgrundsatz beruht auf der bestmöglichen Auflösung des Zielkonflikts zwischen Anwendbarkeit, Flexibilität und Sicherheit. Eine Studie zum Potential eines Einsatzes von intelligenten



Regelungsmethoden, beispielsweise modellprädiktiver Regelung, unter Berücksichtigung von Schätzungen zum Energiebedarf in Haushalten hat ergeben, dass mit der vorhandenen thermischen Trägheit und dem aktuellen Emissionsverhalten des Aladin II mBHKWs ein flexibler ON/OFF-Betrieb mit häufigen aber kurzen Laufzeiten aktuell nicht zielführend ist. Der Betriebsablauf wird unabhängig von der verwendeten Methode so geplant, dass nach dem Anschalten des Blockheizkraftwerks ein Dauerbetrieb ausgeführt wird, bis die Grenze des Energiepufferspeichers erreicht ist und aufgrund dessen ein Abschalten der Anlage erfolgen muss. Die untersuchten Methoden unterscheiden sich einzig im Zeitpunkt des Anschaltens des BHKWs, der massgeblich durch die Schätzung des zukünftigen Energiebedarfs in Zusammenhang mit der Betriebsstrategie (wärmegeführt oder stromgeführt) bestimmt wird.

Im Kontext des Aladin II mBHKW wurde somit ein modulares Betriebskonzept entwickelt, bei dem an einen zentralen Eingang Startsignale aus verschiedenen Quellen aufgenommen und in einem Anlagenstart umgesetzt werden können. Beispiele hierfür sind:

- Manuell durch Mitarbeiter (PC oder Schaltkasten)
- Automatisiert durch integrierte Heizungssteuerung
- Dedizierten Planer mit Bedarfsprädiktion
- Netzbetreiber, sofern Anlage zur Netzstabilisierung eingesetzt wird

Die Prüfstandsuntersuchungen im Rahmen des Projekts Aladin II wurden ohne Bedarfsprädiktion durchgeführt. Ferner ist zu diesem Zweck ein kalendarischer Betriebsplan erstellt worden, der von den jeweiligen Anlagenverantwortlichen fortlaufend aktualisiert und der Prüfstandsbetrieb somit sowohl tageweise als auch stundenweise an personelle Anwesenheiten angepasst werden konnte.

Die Umsetzung einer externen Ansteuerung durch Netzbetreiber ist schnittstellentechnisch implementiert. Einzig die formattechnische Angleichung des Startsignals muss gewährleistet sein. Ein entsprechendes Signal wird vom Betriebskonzept anders klassifiziert als die übrigen Formen der Startsignale. Bei Netzstabilisierungsaufgaben ist eine schnelle Verfügbarkeit maximaler elektrischer Leistung notwendig. Eine Optimierung der Kaltstartemissionen oder des thermischen Aufwärmverhalten ist in diesem Fall nicht zweckmässig. Daher werden bei einem entsprechenden Startsignal die in Kapitel 5 und Kapitel 4.2.2 vorgestellten Konzepte zur Optimierung des Kaltstarts bzw. Aufwärmverhaltens aufgrund der damit verbundenen Reduzierung der elektrischen Leistung während der Aufwärmphase nicht ausgeführt. Der ordnungsgemässe und sichere Betrieb ist dennoch gewährleistet. Mit diesen Massnahmen kann das Aladin II mBHKW innerhalb von t = 10sek nach Startsignal eine elektrische Leistung von 6.9kWel und innerhalb von t = 25sek seine nominelle Leistung von 7.4kWel zur Netzstabilisierung bereitstellen. Die Verzögerung bis zum Erreichen der nominellen elektrischen Wirkleistung resultiert aus dem Einregelvorgang des Luftverhältnisses nach einem Startvorgang (vgl. Kapitel 4.2.1).

4.4 Fernwartungszugriff & Datenmanagement

Ein zentrales Element bei der Betreibung der verschiedenen Anlagen bildet die Datenerfassung. Mit Ausnahme der Laboranlage an der ETH Zürich findet keine dauerhafte Überwachung des Betriebs durch einen verantwortlichen Mitarbeiter statt. Zur Überwachung der Zielgrössen, sowie zu diagnostischen Zwecken wurde an der ETH Zürich daher ein geeignetes Datenerfassungssystem entwickelt, dass prozesstechnisch eine möglichst einfache Datenauswertung sowie Fehlerinformation und –untersuchung ermöglicht. Die Speicherung der Daten erfolgt auf ETH-eigenen Servern und ist mit dieser Massnahme durch entsprechende Verschlüsselungsmethoden geschützt. Eine schematische Darstellung des Aufzeichnungs- und Datenübertragungsprozesses ist in Abb. 18 gegeben.

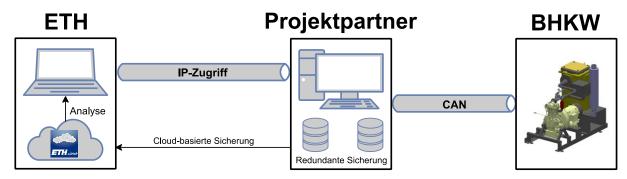


Abb. 18: Datenerfassungskonzept für externe Prototypenanlagen

Im Vergleich, beispielsweise mit lokalen Datenspeicherkonzepten, bildet das in Abb. 18 dargestellte Konzept gleichzeitig eine sichere Speicherung und einen vereinfachten Auswerteprozess ab. Die ETH Zürich ist für die Datenauswertung und –beurteilung zuständig. Die Speicherung auf Servern der ETH Zürich erweist sich hier als sehr vorteilhaft. Ferner bietet die ETH Zürich eine dauerhafte Datenübertragung und keine Einschränkungen hinsichtlich der Datenmenge an, was insbesondere bei der Anzahl von vier externen Anlagen und zur zeitnahen Diagnose vorteilhaft ist. Prozesstechnisch werden die Daten via CAN-Bus auf den lokalen Prüfstands-PC übertragen und dort in ein zur Speicherung optimiertes Datenformat verarbeitet. Der Transfer an die Datenbankumgebung der ETH Zürich erfolgt per gesicherter Verbindung. Mit einer speziell programmierten Auswerteoberfläche können selbst grosse Datenmengen schnell eingelesen werden. Dies ermöglicht insbesondere eine schnelle und einfache Datenauswertung/-einsicht zu Diagnosezwecken. Die Speicherung erfolgt anhand vorgegebener Zyklen, sodass ein optimales Verhältnis zwischen Datensicherheit und Speichervolumen sichergestellt ist.

Zur externen Kontrolle kann jeder Prüfstands-PC über eine gesicherte Remote-Desktop Verbindung erreicht werden. Über die speziell entwickelte, die auf diesem lokalen Rechner die Anlagensteuerung und -überwachung übernimmt, können somit auch von extern Eingriffe vorgenommen werden. Aus Sicherheitsgründen sind Eingriffe, die den Betriebszustand der Anlage (Starten, Stoppen, Betrieb) verändern nur unter Koordinierung und Observierung mit und durch eine verantwortliche Person am Prüfstand zulässig. Parameterjustierungen und besonders diagnostische Unterstützung kann mit diesem Fernwartungs- und Dateimanagementkonzept jedoch zielgerichtet und ergebnisorientiert erfolgen.



5 Minimierung der Kaltstartemissionen

5.1 Emissionsproblematik von 3-Wege-Katalysatoren

Motorische Schadstoffe sind eine Gefahr für Mensch und Umwelt. Diese Schadstoffe werden in drei Kategorien aufgeteilt: NOX-, CO- und THC-Emissionen (engl.: total hydro carbons, dt.: totale unverbrannte Kohlenwasserstoffe). NOX-Emissionen wandeln sich zu O3 um, was für den Menschen kanzerogen wirkt. Somit bilden NOX-Emissionen eine direkte Gefahr für die Gesundheit [4]. CO-Emissionen sind für den Menschen insofern gefährlich, als dass hohe lokale Konzentrationen zum Erstickungstod führen. In der Atmosphäre werden diese Emissionen durch OH-Radikale zu CO₂ oxidiert und stellen dann keine weitere gesundheitliche Gefährdung mehr dar [5]. Da in der Aladin II mBHKW-Anlage Erdgas verbrannt wird, welches zu über 90% aus Methan besteht, enthalten die THC-Emissionen mehrheitlich Methan. Methanemissionen wirken 32-mal stärker als Treibhausgas als CO₂ und sind deshalb eine grosse Bedrohung für das Klima [16]. Um den Menschen zu schützen sind vom Gesetzgeber Emissionsgrenzwerte erlassen worden. Diese betragen in der Schweiz gemäss Luftreinhalte Verordnung [7] für stationäre Gasmotoren mit einer Feuerungsleistung von unter 100 kW für CO 650 mg/Nm³ @ 5% O2 und für NOX 250 mg/Nm³ @ 5% O2, wobei in Ballungsgebieten von lokalen Behörden strengere Grenzwerte festgelegt werden können. Beispiel hierfür ist Zürich mit einem NOX-Grenzwert von 50 mg/Nm³ @ 5% O₂ bei gleichbleibendem CO-Grenzwert [8]. Die Zürcher Regelung wird im Folgenden als LRV+ bezeichnet. THC-Emissionen sind zurzeit nicht reglementiert, es ist jedoch davon auszugehen, dass mit den neuen Klimazielen solche eingeführt werden.

Die Rohemissionen des Aladin II Motors überschreiten diese Grenzwerte deutlich. Diese müssen deshalb mittels Abgasnachbehandlung abgebaut werden. Hier kommt der Drei-Wege-Katalysator zum Einsatz. Dieser wandelt die Schadstoffe in ungefährliche Abgase um. Die Globalreaktionen im Katalysator sind:

- $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$
- $C_m H_n + (m + n/4)O_2 \rightarrow mCO_2 + n/2H_2O$
- $2NO + 2CO \rightarrow N_2 + 2CO_2$

Diese Reaktionen finden nur bei exakt stöchiometrischen Verbrennungsverhältnissen gleichzeitig statt. Ist die Verbrennung zu mager besteht ein Sauerstoffüberschuss. Da die Adsorptionsreaktion von Sauerstoff auf die Katalytische Oberfläche eine höhere Bindungsaffinität aufweist als jene für NOX, führt dies zu einer Sättigung des Katalysators mit Sauerstoff und somit zu einer Umsatzblockade bei den Stickoxiden. Wird der Motor zu fett betrieben befindet sich zu wenig Sauerstoff im Abgas, um die CO-und THC-Emissionen umzusetzen.

Damit der Umsatz auf der Katalytischen Oberfläche beginnt, muss eine gewisse Betriebstemperatur erreicht werden. Die Temperatur, bei welcher 50% der Rohemissionen eines gewissen Schadstoffs umgesetzt werden ist charakteristisch und wird T_{50} genannt. Die Zeit nach Motorstart, bei welcher T_{50} erreicht wird, wird als t_{50} für den jeweiligen Schadstoff bezeichnet. Beide Kenngrössen sind nicht nur vom Schadstoff abhängig, sondern auch von der Edelmetallzusammensetzung und dem Alter der katalytischen Oberfläche. Bei einem neuen Katalysator liegt T_{50} von CO bei 160-230 °C, derjenige von NOX bei 380-440 °C und der von CH_4 bei 380-480°C. Mit zunehmendem Alter nehmen diese Temperaturen zu [9]. Speziell zu erwähnen sind die THC-Emissionen. Methan weist eine hohe Aktivierungsenergie auf im Vergleich zu Benzin. Das bedeutet, dass im Gasbetrieb eine vergleichsweise hohe Temperatur im Katalysator erreicht werden muss.



5.2 Methoden zur Kaltstartemissionsminimierung

5.2.1 Übersicht

Das Aladin II Projekt hat zum Ziel eine hochflexible und gleichzeitig möglichst schadstoffarme mBHKW-Anlage zu entwickeln. Die Schadstoffarmut wird hierbei nicht nur an der ausgestossenen Schadstoffkonzentration im stationären Betrieb gemessen, sondern auch an den kumulierten Emissionen pro Betriebszeiteinheit. Der angestrebte flexible Betrieb verlangt im Gegensatz zu grossen BHKW's im Dauerbetrieb mehrere Systemstarts pro Tag von unterschiedlicher Betriebsdauer. Zwischen zwei Betriebszeiten liegen unregelmässig lange Stillstandzeiten während derer sich die Anlage und insbesondere der Katalysator entsprechend unterschiedlich fest abkühlt. Kalt- (ganze Anlage ist auf Umgebungstemperatur) und Warmstarts haben also einen grossen Anteil an der totalen Betriebszeit einer BHKW Anlage im flexiblen Betrieb. Während eines Kaltstarts und anschliessendem Betrieb bis zu einer totalen Laufzeit von einer Stunde entstehen in den ersten 16 Minuten über 99% der kumulierten NOX-Emissionen und über 95% der THC-Emissionen (siehe Referenzfall A in Tab. 7). Durch den hohen Anteil an Kalt- und Warmstarts im vorgesehenen Betriebskonzept und wegen des hohen Anteils der kumulierten Emissionen in den ersten paar Minuten ist eine Minimierung der Emissionen in der Kaltstartphase am wirkungsvollsten.

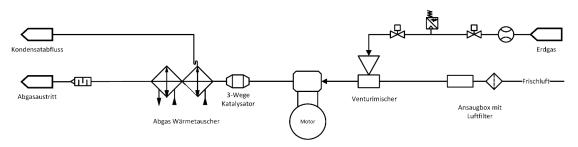
Es gibt diverse Massnahmen zur Reduktion der Kaltstartemissionen: Schnelleres Aufwärmen des Kats (Verkürzung von t₅₀), langsameres Abkühlen / warm halten des Kats oder verhindern respektive abfangen von emissionsreichem Abgas in den ersten paar Minuten. In diesem Unterkapitel werden folgende möglichen Konzepte erläutert und auf die Umsetzbarkeit in der mBHKW-Anwendung geprüft:

- Zündwinkelverschiebung
- Lambdastrategie
- Abgasspeichersystem
- Sekundärluftsystem
- EHC-System
- Latentwärmespeicher

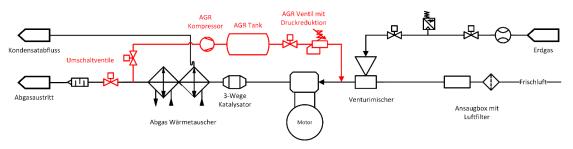
Die Konfiguration des Ansaug- und Abgastraktes für die Verschiedenen Konzepte sind in Abb. 19 dargestellt. Die Zündwinkelverschiebung, die Lambdastrategie und der Latentwärmespeicher sind unabhängig von der Konfiguration der Gastrakte anwendbar.



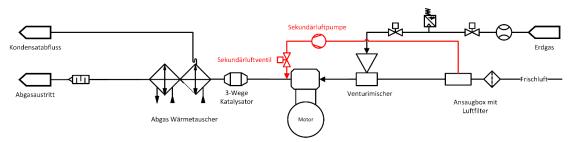
Referenzsystem



Abgasspeichersystem



Sekundärluftsystem



EHC-System

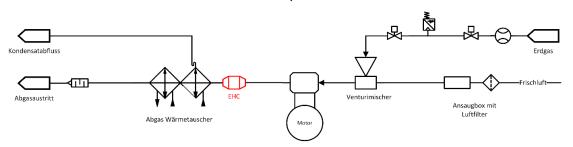


Abb. 19: Vier Ansaug- und Abgastraktkonfigurationen um Kaltstartemissionen zu reduzieren. Zündwinkelkorrektur, Lambdastrategie und Latentwärmespeicher können unabhängig von der Gastraktkonfiguration z.B. am Referenzsystem (ganz oben) appliziert werden. Das Abgasspeichersystem, das Sekundärluftsystem und das EHC-System sind separat darunter dargestellt.



5.2.2 Zündwinkelverschiebung

Der Zündwinkel ist ein wichtiger Parameter des Motorbetriebspunktes, welcher die Leistung, die Abgastemperatur und die Rohemissionen beeinflusst. Das Aladin II mBHKW wird im stationären Betrieb bei MBT-Zündwinkel (MBT: Maximum Brake Torque, dt: Maximales Drehmoment) betrieben, welcher 30° vor OT ist (siehe Abb. 20). Wird früher oder später gezündet, nimmt das Drehmoment und damit auch die Leistung ab. Folglich resultiert bei gleichbleibendem Luftmassenstrom und Lambda-Wert eine tiefere elektrische Effizienz. Gleichzeitig erhöht sich die im Abgas verbleibende thermische Energie, was bei gleichem Abgasmassenstrom zu einer höheren Abgastemperatur führt (siehe Abb. 20). Mit dem späteren Zünden vermindert sich auch der Spitzendruck und somit die Spitzentemperatur im Zylinder. Dies wiederum führt zu einer Verminderung der NOX-Rohemissionen, da diese exponentiell von der in-Zylinder Temperatur abhängen.

Um den Katalysator schneller zu erwärmen und gleichzeitig die NOX-Rohemissionen des Motors zu senken wird der Zündwinkel verkleinert, was einem Zündwinkelvorzug (engl.: spark advance, abk.: SA) entspricht. Im Folgenden wird diese Strategie daher SA-Strategie genannt. Der Zündwinkel kann nicht beliebig vorgezogen werden, da schlussendlich ein Zünden respektive der störungsfreie Motorbetrieb nicht mehr möglich ist. Zudem erreichen die Bauteiltemperaturen im Abgastrakt bei extrem grossem SA nach einer gewissen Zeit ihre Grenzen. Aus diesem Grund wird der SA für die Kaltstartphase nur bis zu dem Punkt verändert, an dem der 3-Wege Katalysator die Schadstoffemissionen reduziert bzw. oxidiert und somit effizient arbeitet. Im vorliegenden Fall wurde dieses Event auf das Erreichen einer Katalysatortemperatur von $\vartheta_{\text{Kat}} = 650\,^{\circ}\text{C}$ gesetzt.

Der Zündwinkel für den Kaltstartvorgang des Aladin II mBHKW wurde empirisch ermittelt. In einer Vielzahl von Untersuchungen wurde der SA zwischen $\zeta=12^\circ...30^\circ$ (vor OT) variiert. Die Kenngrössen für diese Untersuchungen sind die Temperaturen im Abgastrakt, sowie die CO-, HC- und NOx-Emissionen am Ausgang des Katalysators. Für $\zeta<18^\circ$ wurden Abgastemperaturen am Ausgang des Motors von $\vartheta_{\text{Motor_aus}} > 780^\circ\text{C}$ gemessen. Diese Temperatur stellt jedoch eine vom Motorenhersteller gesetzte Grenze dar, um die Belastung der Auslassventile zu begrenzen. Daher musste die SA-Strategie so adaptiert werden, dass die Abgastemperatur am Motorausgang unterhalb dieses Limits bleibt. Zu diesem Zweck wurde eine Vorsteuerung realisiert, die den SA graduell erhöht, wann immer die Motorausgangstemperatur 780°C überschreitet. Fällt $\vartheta_{\text{Motor_aus}}$ anschliessend wieder unter 780°C wird der letzte eingestellt SA so lange gehalten, bis die 780°C erneut überschritten werden oder das globale Abschaltkriterium von $\vartheta_{\text{Kat}} = 650^\circ\text{C}$ erreicht ist. Im zuletzt genannten Fall wird der SA bis zum Abschalten der Anlage auf MBT-Timing und damit auf $\zeta=30^\circ$ gesetzt.

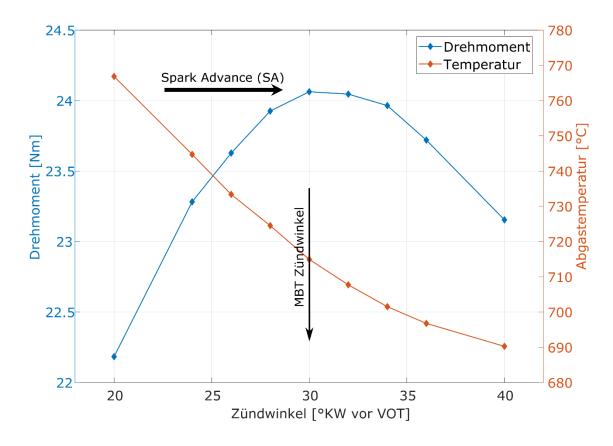


Abb. 20: Drehmoment und Abgastemperatur des Aladin II Motors in Abhängigkeit des Zündwinkels

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass SA von ζ < 18° zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führen. Dies ist vornehmlich auf die durch die Vorsteuerung eingebrachte Dynamik des Verbrennungsvorgangs zurückzuführen. Die Vorsteuerung bewirkt, dass zum Teil innerhalb weniger Motorzyklen verschiedene Zündwinkel eingestellt werden. Da in diesem Zusammenhang kein eindeutiger Trend ablesbar war und im Sinne einer hohen Aussagegüte der Ergebnisse reproduzierbare Ergebnisse von höherer Priorität sind, wurde ein konstanter Zündwinkel von ζ = 18° für den Kaltstartvorgang gesetzt. Diese Einstellung wird im Folgenden als SA-Strategie bezeichnet.

Die Resultate in Abb. 21 bestätigen die bekannten Abhängigkeiten der Emissionen vom Zündwinkel. Die NOX-Emissionen nach dem Katalysator werden im Vergleich mit MBT-Timing bei $\zeta=30^\circ$ um mehr als 50% verringert. Die HC-Emissionen werden ebenfalls verkleinert, wenn auch mit einem weitaus kleineren Faktor als bei den NOX-Emissionen. CO-Emissionen werden vom Zündwinkel primär nicht beeinflusst. Die in Abb. 21 dargestellten Emissionen sind nach dem Katalysator gemessen. Wie eingangs beschrieben hat der Zündwinkel bzw. dessen Vorzug einen signifikanten Einfluss auf die Abgastemperatur. Das heissere Abgas beschleunigt damit die Erwärmung des Katalysators. Dieser beginnt in der Folge früher damit das im Abgas befindliche CO zu oxidieren. Somit ist in Abb. 21 eine Verringerung der CO-Emissionen zu erkennen, obwohl die Rohemissionen von CO nicht direkt vom Zündwinkel abhängen.

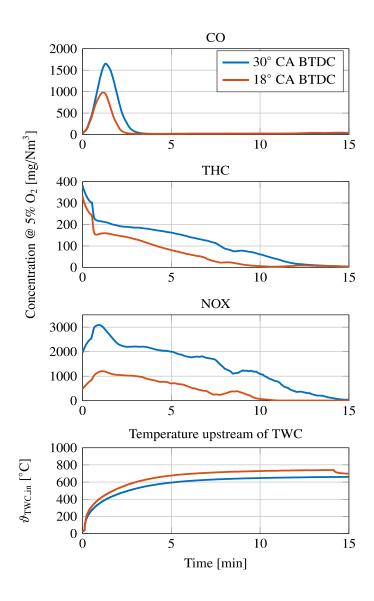


Abb. 21: Einfluss des Zündwinkels auf die Emissionen nach und die Temperatur vor dem Katalysator

5.2.3 Anpassung der Lambdaregelung

Das Luftverhältnis λ ist eine weitere Kenngrösse, über deren Einstellung das Emissionsverhalten eines Verbrennungsmotors beeinflusst werden kann. Im Kontext des Aladin II mBHKW wird eine Lambdaregelung mit einer kaskadierten Struktur eingesetzt, die sowohl das Luftverhältnis vor, als auch nach dem Katalysator regeln und damit das Emissionsverhalten optimieren kann (vgl. Kapitel 4.2.1). Vor dem Hintergrund des Ziels die Kaltstartemissionen zu verringern, wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die aufzeigen, wie eine Adaption der Lambdaregelung das Emissionsverhalten des Aladin II mBHKW währen der Kaltstartphase beeinflusst. Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Veränderung des Sollwerts für die Lambdaregelung, um den Eingriff in die Struktur der Lambdaregelung so gering wie möglich zu halten. Weiterhin wurde nur eine Adaption des Regelkreises der vor dem Katalysator aktiv ist berücksichtig. Dies ist darin begründet, dass während eines Kaltstarts der Katalysator zunächst aufgewärmt werden muss. Erst wenn diese Erwärmung abgeschlossen ist, wird der Regelkreis mit der Diagnosesonde nach dem Katalysator (vgl. Kapitel 4.2.1)



zugeschaltet. Daher ist es zweckmässig, diesen Regelkreis hinsichtlich Untersuchungen zum Kaltstartvorgang von der Betrachtung auszunehmen.

Im Referenzfall "REF" ist der Sollwert der Lambdaregelung, im Folgenden als λ_{des} (engl: desired) bezeichnet, auf den Wert eingestellt, der im stationären Zustand die niedrigsten Emissionen produziert. Die Grundlage der Untersuchungen zur Adaption von λ_{des} basiert auf der Annahme, dass dieser Wert während eines Kaltstartvorgangs nicht die niedrigst möglichen Emissionen bewirkt. Die Resultate für den Referenzfall "REF" zeigen eine schnelle Abnahme von CO- und HC-Emissionen (Abb. 22). Demgegenüber bleiben die NOX-Emissionen über einen langen Zeitraum vergleichsweise hoch. Tatsächlich nehmen die NOX-Emissionen erst ab, wenn der Regelkreis nach dem Katalysator zugeschaltet wurde. Die aktuell gültigen Emissionsrichtlinien, insbesondere die Luftreinhalteverordnung und die stadtspezifischen Erweiterung der Städte Zürich und Basel, setzen die Grenze für NOX-Emissionen auf bis zu 1/10 der für CO gültigen Grenze [7, 8]. Entsprechend ist es zweckmässig, ein grösseres Gewicht auf die Verringerung der NOX-Emissionen zu legen, auch wenn dies bedeutet, dass sich die CO-Emissionen erhöhen.

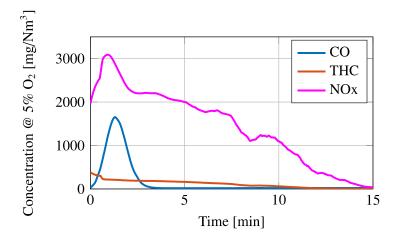


Abb. 22: Referenzfall - Emissionen nach dem Katalysator

Die zu Beginn untersuchte Strategie basierte auf einem Umschaltvorgang von einem leicht in den fetten Bereich verschobenen Sollwert ($\lambda_{des_CS} = 0.992 \cdot \lambda_{des_SS}$) für die Kaltstartphase zum nominellen Wert im stationären Zustand λ_{des_SS} (CS = coldstart, SS = steady-state). Die Resultate in Abb. 23 zeigen eine deutlich beschleunigte NOX-Reduktion im Vergleich mit dem Referenzfall. Eine entsprechende Erhöhung zeigt sich dagegen bei den CO-Emissionen. Um dieser drastischen Erhöhung der CO-Emissionen entgegenzuwirken, wurde empirisch ein Wert $\lambda_{des_CS} = 0.996 \cdot \lambda_{des_SS}$. Wie in Abb. 23 dargestellt, kann so ein moderater Anstieg der CO-Emissionen bei immer noch ausreichend schneller NOX-Reduktion erreicht werden. Allerdings ist diese Strategie noch immer suboptimal. Dies liegt darin begründet, dass der Zeitpunkt des Umschaltvorgangs von $\lambda_{des_CS} \rightarrow \lambda_{des_SS}$ einen grossen Einfluss auf alle betrachteten Emissionen hat. Geschieht das Umschalten zu früh, ist λ_{des_SS} unter Umständen noch nicht optimal für die aktuellen Betriebsbedingungen des Katalysators. Die Folge ist ein Sauerstoffüberschuss der sich in einer deutlichen Verlängerung des NOX-Reduktionsverhaltens ausdrückt. Demgegenüber bewirkt ein spätes Umschalten einen graduellen Anstieg der CO-Emissionen nachdem das CO eigentlich schon nahezu vollständig oxidiert wurde. Dieses Verhalten geht einher mit der stetigen Erwärmung des Katalysators über die Kaltstartphase hinweg.

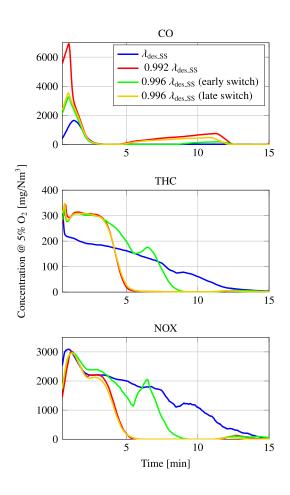


Abb. 23: Lambdastrategien im Relation zum Referenzfall

Um die damit verbundene Dynamik des Katalysatorverhaltens zu minimieren, besteht die finale Strategie zur Anpassung des Sollwerts der Lambdaregelung aus einer diskreten Erhöhung von λ_{des_CS} , ausgehend von dem zuvor ermittelten Startwert $\lambda_{des_CS} = 0.996 \cdot \lambda_{des_SS}$. Der Sollwert λ_{des_CS} wird somit schrittweise, basierend auf empirisch ermittelten Temperaturgrenzen im Abgastrakt, in Richtung des stationären Wertes λ_{des_SS} erhöht. Damit stellt diese Strategie funktional eine Sollwerttrajektorie für die Lambdaregelung während der Kaltstartphase dar. Die Sollwertsprünge werden mit dieser Strategie in unregelmässigen Abständen von t_{Intervall} > 3min eingestellt. Damit ist eine Beeinträchtigung der Qualität der Lambdaregelung ausgeschlossen, deren Dynamik auf die Reaktion auf Sollwertsprünge im Bereich von t_{Intervall} < 5sek ausgelegt ist. Das Ergebnis in Abb. 24 zeigt, dass für CO kein gradueller Anstieg mehr erkennbar ist und die Umsetzung von HC und NOX nur geringfügig verlängert wird. Lokale Erhöhung durch die schrittweise Erhöhung der Sollwertvorgabe sind nahezu nicht messbar. Diese Strategie wird nachfolgend als "AFR-Strategie" bezeichnet (engl. AFR = air/fuel ratio).

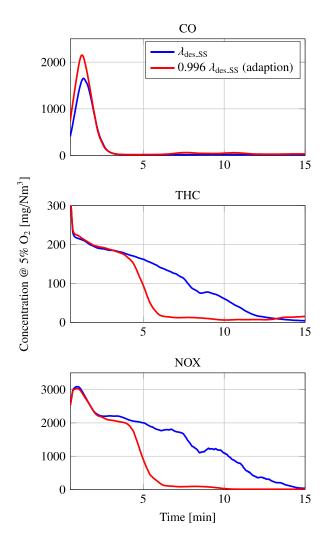


Abb. 24: Emissionen nach Katalysator für finale Lambda-Sollwertstrategie

5.2.4 Abgasspeichersystem

Das Abgasspeichersystem (siehe zweites Konzept von oben Abb. 19) sieht vor, dass das Abgas während des Kaltstartes über den AGR-Kompressor (Abgasrückführung, Abk.: AGR) in den AGR-Tank gepumpt und nicht an die Umwelt abgegeben wird. Das gespeicherte Abgas wird durch das AGR-Ventil zu einem bestimmten Prozentsatz (AGR-Rate) dem Ansauggemisch beigemischt bis der Tank wieder leer ist. Die Umschaltventile nach dem Abgaswärmetauscher stellen nach Ablauf der Sammeldauer sicher, dass das Abgas in den Abgasaustritt gelangt und somit an die Umwelt abgegeben wird.

Mit diesem System kann abhängig von der Abgassammeldauer die Menge der Kaltstartemissionen absolut frei bestimmt werden. Wird z.B. im Extremfall das Abgas bis zum kompletten Erwärmen des Katalysators gesammelt (über ca. 16 Minuten, vgl. Referenzfall A in Abb. 29) können die Kaltstartemissionen vollständig vermieden werden. Bei einer für die vorliegende Anwendung maximal möglichen AGR-Rate von 15% dauert das Leeren des AGR-Tanks jedoch 6.9 mal länger als das Füllen. Für minimale Emissionen müsste also bei einer Fülldauer von 16 Minuten ein Betrieb mit heissem Katalysator über 110 Minuten gewährleistet sein.

Die kontinuierliche Abgasrückführung wird üblicherweise bei Mager- oder Dieselmotoren eingesetzt um die NOX-Emissionen zu verringern. In der hier diskutierten Anwendung kann von diesem Vorteil nur 40/72



sehr bedingt profitiert werden, da die Rohemissionen nicht relevant sind, solange das Abgas gespeichert wird. Wird das Abgas bei betriebswarmen Katalysator an die Umwelt abgegeben, ist die Umsetzungseffizienz des Katalysators so hoch, dass die Rohemissionen wiederum nicht mehr relevant sind. Während diesen Zeiten wird AGR also nur dazu verwendet, den Abgasspeicher zu leeren. Das AGR-Konzept wird also erst dann bezüglich Emissionsreduktion interessant, wenn der Abgassammelvorgang abgebrochen wird, bevor die NOX-Emissionen ihren stationären Wert erreichen. Dieser Zeitpunkt muss aber so gewählt werden, dass die HC-Emissionen bereits ihr Minimum erreicht haben, da diese nicht oder allenfalls sogar negativ durch AGR beeinflusst werden. Generell wird der zeitliche Gewinn jedoch als klein eingeschätzt, da die THC-Emissionen nur ca. eine Minute vor den NOX-Emissionen ihren Stationärwert erreichen (Siehe Referenzfall A in Abb. 29 und Abb. 31).

Während des Abgassammelvorgangs als auch während des Leerens erleidet das System elektrische Leistungseinbussen. Für das Komprimieren wird elektrische Energie benötigt und während dem Betrieb mit AGR kann durch die schlechtere Füllung im Motor weniger elektrische Energie produziert werden. Abb. 25 zeigt die produzierte elektrische Energie bis zum kompletten Entleeren des AGR-Tanks in Abhängigkeit der Fülldauer. Die für das Komprimieren des Abgases nötige Energie wurde mittels isothermer Volumenarbeit bei einem idealen Kompressor (Wirkungsgrad = 100%) abgeschätzt. Bei einer AGR-Rate von 15% während dem Entleervorgang des Tanks wird dem System 13.8% weniger Brennstoffleistung zugeführt. Rechnet man konservativ mit einem von der AGR-Rate unabhängigen elektrischen Wirkungsgrad von 32.5%, ergeben sich abhängig von der Sammeldauer Einbussen in der produzierten elektrischen Energie von mindestens 13 – 17% über den gesamten Zeitraum des Füllens und komplett Entleerens des AGR Tanks. Die gesamte Zeit rechnet sich als Sammeldauer plus Entleerdauer, was bei 15% AGR-Rate dem 7.9-fachen der Sammeldauer entspricht.

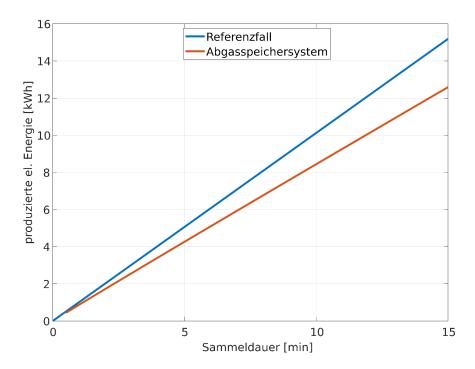


Abb. 25: Produzierte elektrische Energie während der Zeit des Füllens und Entleerens des AGR-Tanks in Abhängigkeit der Sammeldauer. Miteinbezogen sind hier Verluste, die durch das Komprimieren während des Sammelvorgangs entstehen wie auch jene welche durch den AGR-Betrieb beim Entleeren anfallen.



5.2.5 Sekundärluftsystem

Beim Ansatz der Sekundärlufteinblasung steht die Postoxidation von HC- und CO-Emissionen im Vordergrund. Dadurch sollen einerseits diese Emissionen verringert und andererseits die Abgasenthalpie durch die Verbrennung erhöht werden. Dies wiederum wird die t50 Zeiten verkürzen und somit die Kaltstartemissionen senken. Dieses System benötigt eine Sekundärluftpumpe und ein Ventil um die Menge zu regeln (siehe Abb. 19). Um eine möglichst hohe Umsetzrate der HC- und CO-Emissionen zu erreichen, muss die Einblasung möglichst nahe am Auslassventil platziert werden, da dort die höchsten Temperaturen vorherrschen [10].

Um den Aufwärmeffekt zu erhöhen, kann der Motor mit Brennstoffüberschuss (λ < 1) betrieben werden und die Sekundärluftmenge entsprechend angepasst werden. Abb. 26 zeigt die theoretisch möglichen Abgastemperaturen nach dem Katalysator für verschiedene Lambdas wenn jeweils 100% des vorhandenen Brennstoffes umgesetzt würde. Durch die anfänglich sehr tiefen Temperaturen und den grossen Anteil an inerten Gasen (CO_2 , H_2O und N_2) können in der Praxis diese Werte jedoch nicht erreicht werden. Die zugeführte Sekundärluft hat bei tiefen Temperaturen einen kühlenden Effekt. Sekundärluft würde in der Praxis erst ab einer gewissen Temperatur zugeführt werden. Auch eine Verringerung des Motorlambdas ist erst ab diesem Zeitpunkt sinnvoll. Beim Betrieb mit Brennstoffüberschuss besteht bei nicht komplettem Umsetzen die Gefahr von erhöhten HC-Emissionen. Zudem verschlechtert sich dadurch der elektrische Wirkungsgrad.

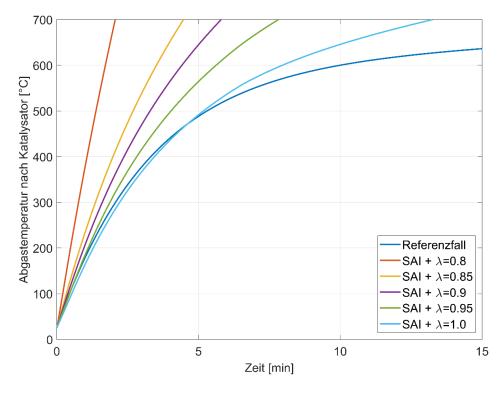


Abb. 26: Theoretische, berechnete Abgastemperaturen nach dem Katalysator für verschiedene Brennstoff-Luft Verhältnisse und Sekundärlufteinblasung (SAI) bei 100% Umsatz des vorhandenen Brennstoffes.



5.2.6 EHC-System

Mit dem von der Firma Continental-EMITEC GmbH hergestellten elektrisch beheizten Katalysator ist in Abb. 27 dargestellt. In Flussrichtung hinter der Heizscheibe folgt der eigentlichen Metallträger mit einer Länge von 80mm. Die nur 11mm lange katalytisch beschichtete Heizscheibe wirkt wie ein Ohm'scher Wiederstand und kann durch 12V Gelichspannung entsprechend beheizt werden. Die Mantelfläche und auch Träger bestehen aus Edelstahl. Damit kann der EHC direkt in den Abgastrakt eingeschweisst werden.

Abb. 28 zeigt berechnete Temperaturverläufe nach der Heizscheibe für drei Leistungsklassen. In dieser Simulation wurde eine Temperatur von 800°C nach der Heizscheibe als Ausschaltkriterium gewählt. Das Beheizen des Katalysators hat verschiedene Effekte. Erstens wird dadurch das Abgas erwärmt und somit t_{50} für den Hauptkatalysator gesenkt. Zweitens sollten Oxidationsreaktionen auf der heissen Heizscheibenoberfläche tendenziell früher ablaufen als bei einem gewöhnlichen Katalysator, wodurch drittens Oxidationswärme freigesetzt wird, was wiederum t_{50} verkürzen sollte. Da jedoch die Zelldichte in der Heizscheibe lediglich 130 cpsi (cells per square inch) ist, wird der grösste Teil des Umsatzes immer noch im Hauptkatalysator stattfinden, wo die Zelldichte bei 600 cpsi liegt. Ein Vorteil des Metallträgers ist, dass dieser im Vergleich zum Automobilkat, der aus Keramik besteht, eine kleinere thermische Masse hat. Dieser Umstand an sich sollte t_{50} ebenfalls verkürzen.

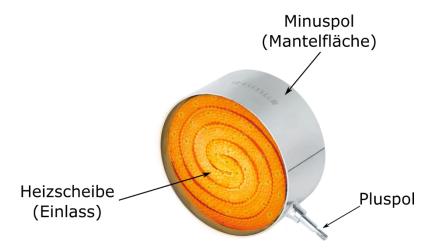


Abb. 27: Bild des elektrische beheizbaren Katalysators Emicat der Continental-EMITEC GmbH [11]. Hinter der ca. 12mm tiefen Heizscheibe folgt ein gewöhnlicher Katalysator mit Metallträger.

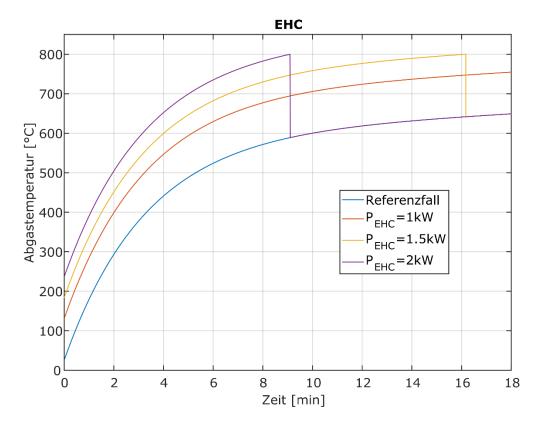


Abb. 28: Die Abgastemperatur am EHC Auslass berechnet für drei unterschiedliche Leistungsklassen. Als Ausschaltkriterium wurde in dieser Simulation 800°C nach der Heizscheibe gewählt.

5.2.7 Latentwärmespeicher

Mit einem Latentwärmespeicher rund um den Katalysator soll dieser dauerhaft auf einer Betriebstemperatur von über 500°C gehalten werden. So kann sichergestellt werden, dass die Emissionskonzentrationen unabhängig von den in der übrigen Anlage vorherrschenden Temperaturen nahezu denen des stationären Betriebs entsprechen. Der Latentwärmespeicher besteht aus einem Material (Phase Change Material, Abk.: PCM) mit möglichst hoher spezifischen latenten Wärme beim Phasenübergang von flüssig nach fest. Das PCM soll eine Schmelztemperatur im angestrebten Temperaturniveau (550 – 650°C) haben. Sharma et al. [12] geben einen generellen Überblick über erwünschte Eigenschaften solcher Materialien und weisen darauf hin, dass die Wärmeleitfähigkeit möglichst hoch sein soll, damit ein möglichst homogenes Abkühlen respektive Aufwärmen stattfindet. Zudem soll das Material chemisch stabil, nicht korrosiv, kompatibel mit dem Wandmaterial und weder toxisch, noch leicht entzündlich oder explosiv sein. Kenisarin [13] listet mögliche Materialien für den Hochtemperatureinsatz (120 – 1000°C) und deren thermodynamischen und chemischen Eigenschaften auf. Für die vorgesehene Anwendung kommt beispielsweise eine Aluminium-Silizium-Legierung in Frage mit den Eigenschaften, wie sie in Tab. 4 dargestellt sind.

Siliziumgehalt	12	%Gew.
Schmelztemperatur	576	°C
Spezifische latente Wärme	560	J/g
Dichte	2.7	g/cm ³
Wärmeleitfähigkeit	160	W/m/K

Tab. 4: Eigenschaften der Aluminium-Silizium Legierung AlSi₁₂ [13].

Für diese Konzeptstudie wurde ein einfaches Wärmeübergangsmodell gemacht, welches aus dem Katalysator (Durchmesser: 114mm) und einem diesen umschliessenden Hohlzylinder (Durchmesser: 210mm) als Behälter für das PCM dient, besteht. Aussen wurde eine Isolationsschicht aufgebracht. Damit der Wärmeübergang an den Katalysator verbessert wird, wurde wie von Laing et al. [14] vorgeschlagen, Kreisscheibenförmige Finnen (Durchmesser 190mm) am Katalysator angebracht. Die so berechnete Phasenübergangszeit von flüssig nach fest beträgt weniger als eine Stunde. Dies liegt vor allem am hohen Wärmeübergang vom Katalysator an die stehende Luft im Innern des Katalysators, welcher aber beim Betrieb der Anlage erwünscht ist.

Sollte das PCM während einer längeren Abschaltzeit komplett kristallisieren und unter die Schmelztemperatur abkühlen, verlängert dies den darauf folgenden Kaltstart entsprechend. Dies wiederum führt dann zu erhöhten Kaltstartemissionen. Im Extremfall übersteigen die Kaltstartemissionen des Systems mit Latentwärmespeicher jene des Referenzsystems. Um dies zu verhindern, muss das PCM elektrisch beheizt werden, was sich negativ auf die Energiebilanz des BHKW-Systems auswirkt.

5.2.8 Bewertung und Schlussfolgerung

Tab. 5 fasst die nachfolgend diskutierte Bewertung der einzelnen Systemen Kaltstartemissionsreduktion zusammen. Die Zündwinkelverschiebung ist ein simples und kostenfreies System mit positiver Wirkung bezüglich NOX-Rohemissionen und Aufwärmverhalten des Katalysators. Zudem kann diese Massnahme mit allen anderen kombiniert werden. Ähnlich verhält es sich mit der Lambdastrategie. Die Umsetzung bedeutet lediglich Programmieraufwand und ist komplett unabhängig von Abgastraktkonfiguration oder anderer gleichzeitig applizierten Systeme zur Emissionsminderung. Das Emissionsreduktionspotential ist ähnlich hoch wie dasjenige der Zündwinkelkorrektur. Ein Vorteil gegenüber letzterer ist jedoch, dass mit der Lambdastrategie kaum elektrische Leistungseinbussen bewirkt werden. Das Abgasspeichersystem hat ein enormes Potential bezüalich Emissionsverminderung. Es hat aber den Nachteil der hohen Komplexität und der Eingeschränkten Flexibilität im Betrieb der Anlage. Bei diesem System muss nämlich sichergestellt werden, dass der AGR-Tank während einer genügend langen Warmphase des Katalysators geleert werden kann. Ist dies aus Bedarfsgründen nicht möglich, muss entweder der Tank bereits geleert werden, wenn der Katalysator noch nicht warm ist, oder es kann gar nicht erst Abgas gesammelt werden, weil der begrenzende Füllstand bereits erreicht ist. Die elektrische Leistungseinbusse während dem Füll- und Entleervorgang kann bis zu 17% betragen. Das Emissionsreduktionspotential des Sekundärluftsystems ist von allen evaluierten Systemen am geringsten und kann sogar negativ werden bei einem Betrieb mit λ < 1. Der einfache und in keiner Weise einschränkende Betrieb eines elektrisch beheizten Katalysators macht dieses System vielversprechend. Aus diesen Gründen wird die Zündwinkelverschiebung sowie das EHC-System an der PT1 Anlage umgesetzt und experimentell detailliert untersucht (siehe Kap. 5.2.2 und 5.2.6). Der Latentwärmespeicher bringt einen extrem hohen Installationsaufwand und ungewisse Handhabungsprozesse mit dem PCM mit sich. Auch die erheblichen zu erwartenden



elektrischen Verluste durch Beheizung des PCM während Stillstandzeiten legen einen Verzicht auf dieses System nahe.

	Installations- aufwand	Emissions- reduktionspotential	Flexibilitäts- einschränkung	Elektrische Leistungs- einbussen
Zündwinkelver- schiebung	-	mässig	-	gering
∑ = 14	4	3	4	3
Lambdastrategie	-	mässig	-	-
∑ = 15	4	3	4	4
Abgasspeichersystem - 2	erheblich	erheblich	mässig	mässig
∑ = 9	1	4	2	2
Sekundärluftsystem	mässig	gering	-	gering
∑ = 11	2	2	4	3
EHC-System ∑ = 13	gering 3	mässig 3	- 4	gering 3
Latentwärmespeicher	erheblich	mässig	gering	erheblich
∑ = 8	1	3	3	1

Tab. 5: Bewertung der 6 Konzepte in vier Kategorien mit einer Punkteskala von 1 bis 4.

5.3 Experimentelle Untersuchungen

Die Untersuchungen zum Einfluss der ermittelten Methoden auf die Minimierung der Kaltstartemissionen setzen sich aus der Untersuchung des Effekts jeder einzelnen Methode, sowie Untersuchungen von Kombinationen zusammen. Eine Übersicht diesbezüglich ist Tab. 6 zu entnehmen.

Im Referenzfall "REF" sind die Einstellungen für das Luftverhältnis λ und den Zündwinkel auf die im stationären Betrieb gültigen Werte gesetzt. Für die Fälle "AFR" und "SA" sind die Einstellungen, ebenso wie für die Kombination "AFR + SA", auf die in Kapitel 4 ermittelten, optimierten Werte angepasst. Daraus ergeben sich die vier Grundfälle "A" – "D". Jeder dieser Fälle wurde darüber hinaus mit eingeschaltetem elektrisch beheizbaren Katalysator (EHC) wiederholt, was einer gesamten Anzahl von acht Fällen entspricht. Um die Robustheit der Ergebnisse gegenüber Messungenauigkeiten und schwankungen zu erhöhen, wurden zu jedem Fall insgesamt drei Experimente durchgeführt. Sämtliche Messungen wurden darüber hinaus in einer mehrtätigen Messkampagne und damit in kurzem zeitlichen Abstand zueinander durchgeführt, um Alterungseinflüsse, beispielsweise des Katalysators oder der Isolierung des Abgastrakts, und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Resultate zu minimieren.

Alle durchgeführten Experimente bestehen aus einer Gesamtdauer von 60min, ausgehend von einem Start bei Raumtemperatur, d.h. sämtliche Starttemperaturen bei $\vartheta_{xi} = 22$ °C (± 3°C). Dies ist insbesondere hinsichtlich des 3-Wege Katalysators von grosser Bedeutung, um die Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten. Sämtliche Messwerte sind mit einer Abtastrate von 1Hz aufgezeichnet. 46/72



Aufgrund der Dynamik der Systemtemperaturen und der verwendeten Messtechnik können Aliasingfehler ausgeschlossen werden. Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse sind für die Massenkonzentration pro Volumen bei 5% Restsauerstoff mit [mg/Nm³ @ 5% O₂] sowie mit [mg] für die jeweilige kumulierte Schadstoffmasse in den industrieweiten Standardeinheiten angegeben.

Strategie	ohne EHC	mit EHC		
REF	А	Аенс		
AFR	В	Венс		
SA	С	C _{EHC}		
AFR + SA	D	Dehc		

Tab. 6: Übersicht der experimentell untersuchten Fälle

5.4 Resultate

Während maximal den ersten 20 Minuten eines Kaltstartes fallen die Schadstoffemissionen von einem Maximum, welches den Rohemissionen entsprechen, auf ein Minimum, dem Niveau der Emissionen im Stationärbetrieb, ab. Die Strategien der in Tab. 6 dargestellten Fälle bewirken einerseits einen unterschiedlich schnellen Abfall der Emissionen und andererseits ein unterschiedlich hohes Niveau der Rohemissionen. In Abb. 29, Abb. 30 und Abb. 31 sind die zeitlichen Verläufe der Emissionskonzentrationen von NOX, CO und THC über die ersten 20 Minuten für alle 8 untersuchten Fälle dargestellt. Als Mass für die Schnelligkeit der Emissionsreduktion wird die charakteristische Zeit tilm definiert. Sie gibt an, wie lange es dauert, bis die jeweilige Emissionskonzentration erstmals unter einen bestimmten Grenzwert fällt (50 mg/Nm³ für NOX und CO, 10 mg/Nm³ für THC). Da die Emissionen, welche nach t_{lim} produziert werden in so geringen Konzentrationen auftreten, haben sie kaum noch Einfluss auf die gesamthaft produzierten Emissionen. Entsprechend gilt es die während t_{lim} produzierte Emissionsmasse Mtilm zu minimieren.



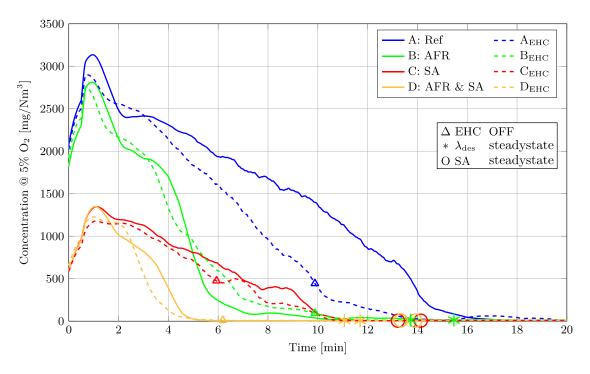


Abb. 29: Zeitlicher Verlauf der NOX Konzentration

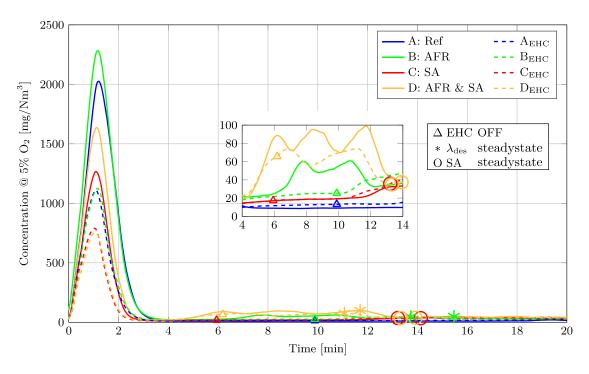


Abb. 30: Zeitlicher Verlauf der CO Konzentration

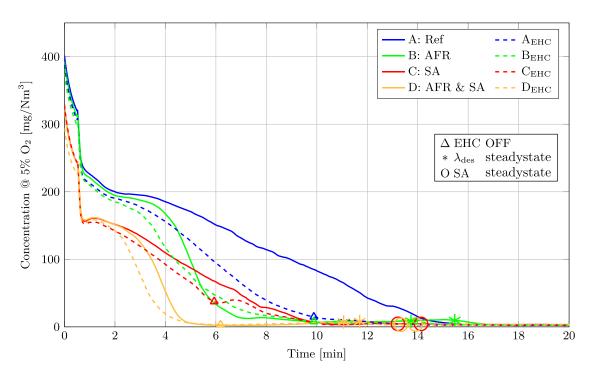


Abb. 31: Zeitlicher Verlauf der HC Konzentration

Tab. 7 zeigt für alle untersuchten Fälle t_{lim}, M_{tlim} sowie das Verhältnis zwischen M_{tlim} und M60, der über 60 Minuten akkumulierten Masse. Für CO ist t_{lim} verhältnismässig kurz und variiert in einem kleinen Bereich von 2.2 (Fall CEHC) bis 3.2 Minuten (Fall B). Die Schnelligkeit der CO-Reduktion wird daher im Weiteren nicht speziell diskutiert. Für NOX und THC Emissionen kann eine klarere Unterscheidung der Strategien beobachtet werden. Bei den THC Emissionen variiert t_{lim} zwischen 4.5 (DEHC) und 14.4 Minuten (A). Im Referenzfall A reduziert der EHC t_{lim} um ca 22%. Sobald jedoch eine der Strategien appliziert wird, kann kaum mehr eine Verbesserung durch den EHC erzielt werden. Die Strategien an sich reduzieren t_{lim} gegenüber dem Referenzfall A um 38% (AFR), 34% (SA) und 67% (Kombination). Auch bezüglich t_{lim} der NOX Emissionen ist ein Profit durch den EHC nur beim Referenzfall ersichtlich, wo diese von 15.9 auf 13.4 Minuten reduziert werden kann, was einer Reduktion von 16% entspricht. Unter Anwendung der Strategien kann t_{lim} gegenüber dem Referenzfall A ähnlich wie bei den THC Emissionen um 40% (AFR), 34% (SA) respektive 70% (Kombination) reduziert werden.

	NO_{x}	CO	THC				
	$(lim = 50 mg/Nm^3)$	$(lim = 50 mg/Nm^3)$	$(lim = 10 mg/Nm^3)$				
Case	t_{lim} [min] / $M_{t_{lim}}$ [mg] / $\frac{M_{t_{lim}}}{M_{60}}$ [-]						
A	15.9 / 12903 / 0.99	3.1 / 1465 / 0.73	14.4 / 941 / 0.95				
A_{EHC}	13.4 / 9598 / 0.98	2.6 / 730 / 0.50	11.3 / 646 / 0.92				
В	9.6 / 5636 / 0.95	3.2 / 1649 / 0.63	9.0 / 544 / 0.86				
B_{EHC}	10.5 / 5812 / 0.95	2.7 / 733 / 0.45	9.4 / 494 / 0.86				
C	10.5 / 4112 / 0.95	2.5 / 814 / 0.49	9.5 / 472 / 0.78				
C_{EHC}	10.2 / 3494 / 0.95	2.2 / 477 / 0.36	9.4 / 403 / 0.87				
D	4.8 / 2101 / 0.89	2.7 / 1078 / 0.47	4.7 / 309 / 0.80				
D_{EHC}	4.5 / 1835 / 0.81	2.3 / 474 / 0.30	4.5 / 250 / 0.78				

Tab. 7: Die charakteristische Zeit t_{lim} ist ein Mass für die Schnelligkeit der Schadstoffreduktion und entspricht der Zeit bis die Konzentration unter einen Grenzwert von 50mg/Nm³ (NOX und CO) oder 10



mg/Nm³ (THC) fällt. M_{tlim} ist die akkumulierte Masse während dieser Zeit. Das Verhältnis M_{tlim}/M60 zeigt den Anteil von M_{tlim} an der total akkumulierten Schadstoffmasse während des stündigen Kaltstarts.

Während einem 60 minütigen Kaltstart werden im Referenzfall A innerhalb der ersten 16 Minuten 99% der totalen NOX- und >95% der totalen THC Masse akkumuliert (Tab. 7). Durch den schnelleren Abfall der Konzentrationswerte und geringeren Rohemissionen können die akkumulierten Massen t_{lim} drastisch verringert werden. Im kombinierten Fall D wird gegenüber dem Referenzfall A innerhalb von t_{lim} nur noch ca. 16% der NOX Masse ausgestossen. Bei CO und THC sind es 73% respektive 33%.

Abb. 32 zeigt die gesamthaft produzierten Emissionsmassen M60 nach einem stündigen Kaltstart. Gegenüber dem Referenzfall A kann die produzierte NOX Masse mit der kombinierten Strategie um 82% reduziert werden. Dieselbe Strategie erlaubt auch eine Reduktion der THC Masse um 61%, führt aber zu einer Zunahme der CO Masse um 15%. Die massive Reduktion der NOX und der THC Masse kann einerseits auf grundsätzlich tiefere Rohemissionen und eine kürzere Aufwärmzeit des Katalysators zurückgeführt werden, was beides durch die SA-Strategie hervorgerufen wird. Andererseits beeinflusst die durch die AFR-Strategie verkürzte tlim die gesamthaft produzierte Masse im positiven Sinne. Die Verkürzung von tlim durch die AFR Strategie ist unabhängig vom Aufwärmverhalten des Katalysators, was in Abb. 33 beobachtet werden kann. Die Gastemperatur nach dem Katalysator entwickelt sich für die Fälle A und B nahezu gleich und dennoch fallen die NOX und THC Emissionen im Fall B viel schneller auf den Stationärwert ab. Die Zunahme der CO Masse ist auf die marginal fettere Verbrennung in der Anfangsphase der AFR Strategie zurückzuführen, was generell zu höheren Rohemissionen führt. Während 5 bis 7 Minuten nach Ablauf von tlim steigt die Konzentration auf ungefähr 100 mg/Nm³ an, bevor sie wieder unter 50 mg/Nm³ sinkt (siehe Abb. 31).

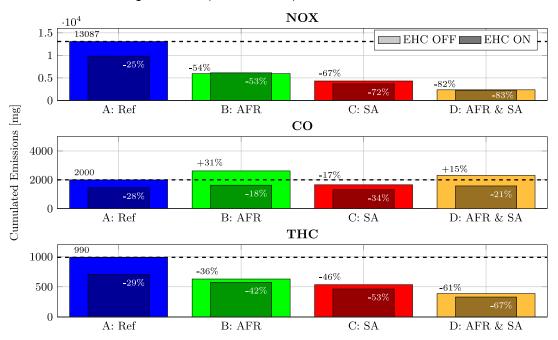


Abb. 32: Akkumulierte Schadstoffmasse während eines stündigen Kaltstarts.

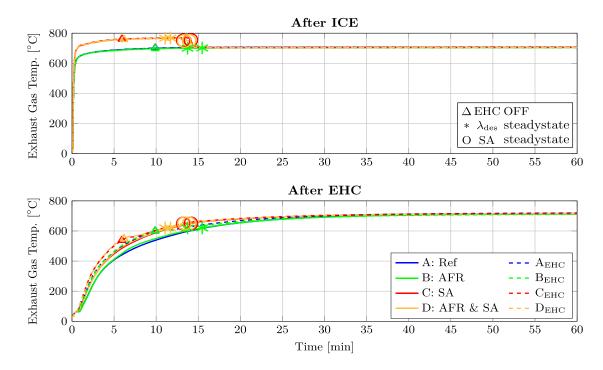


Abb. 33: Zeitlicher Verlauf der Abgastemperatur nach dem Motor (oben) und nach dem Katalysator (unten) während des gesamten Kaltstarts.

Eine späte Zündung (SA Strategie) und der Betrieb des EHC's führt zu einem Leistungsverlust von 6 respektive 9% während der Aktivierungsdauer. Um diesen Leistungsverlust bei der Beurteilung der verschiedenen Emissionsminimierungsmassnahmen miteinbeziehen zu könne, werden die energiespezifischen Emissionen (Emissionsmasse pro produzierte elektrische Energie) betrachtet. Anhand der NOX Emissionen wird dies in Abb. 34 beispielhaft dargestellt. Für den Referenzfall A führt die Aktivierung des EHC's nur bis zur 8. Minute zu leicht erhöhten spezifischen Emissionen. Bereits beim Ausschaltzeitpunkt des EHC's bei ca. 10 Minuten sind die spezifischen Emissionen von Fall AEHC bereits tiefer als jene von Fall A. Da für beide Fälle die Rohemissionen gleich sind, ist die Reduktion der spezifischen Emissionen lediglich auf das schnellere Aufwärmen des Katalysators zurückzuführen. Die SA-Strategie reduziert die Rohemissionen so stark, dass der Leistungsverlust keinen negativen Einfluss auf die spezifischen Emissionen hat; der Spitzenwert der spezifischen NOX Emissionen liegt bei Fall C 56% tiefer als bei Fall A. Auch die AFR Strategie führt aufgrund ähnlicher Argumenten zu niedrigeren spezifischen Emissionen. Entsprechendes gilt natürlich auch für die Kombination der beiden Strategien.

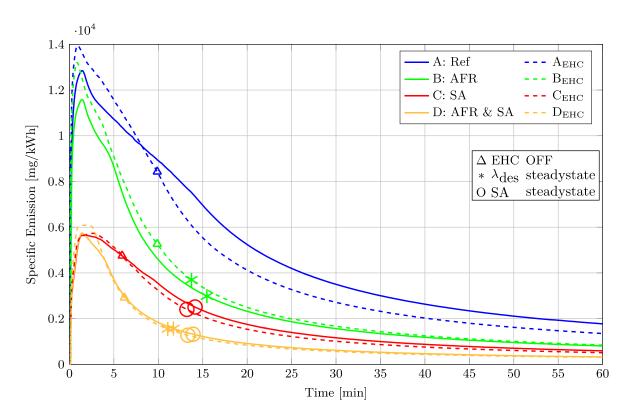


Abb. 34: Integrative energiespezifische NOX Emissionen, berechnet ab Anlagenstart bis zu jedem Zeitpunkt während des stündigen Kaltstarts.

In Abb. 35 werden für alle untersuchten Fälle die über 60 Minuten gemittelten Volumenkonzentrationen dem Stationärwert als auch den geltenden gesetzlichen Grenzwerten der LRV gegenübergestellt. Die gesetzlichen Grenzwerte sind im Stationärbetrieb definiert und werden in jedem Fall deutlich unterschritten. Gemittelt über den Kaltstart übersteigen die NOX Emissionen jedoch den Grenzwert deutlich während die CO Emissionen sogar in dieser Betrachtungsweise weit unter dem Grenzwert liegen. Die THC Emissionen liegen sogar im Referenzfall nur bei ca. 10% des in Deutschland künftig vorgesehenen Grenzwertes von 300 mg/Nm3 [15]. Zurzeit sind die THC Emissionen nicht limitiert. Unter Anwendung der kombinierten Strategie kann die mittlere NOX Konzentration um 83% auf 74 mg/Nm3 gesenkt werden, was noch ca 150% des gesetzlichen Grenzwertes der Stadt Zürich (LRV+) entspricht, jedoch bereits deutlich unter der Bundesweiten Grenze von 250 mg/Nm3 liegt. Der EHC vermag den stündlichen Mittelwert unter Anwendung einer der Strategien kaum weiter senken. Lediglich gegenüber dem Referenzfall A erzielt die Aktivierung des EHC's eine Reduktion von 26%.

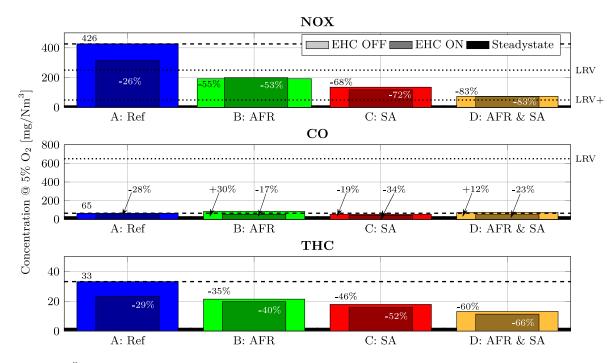


Abb. 35: Über einen stündigen Kaltstart zeitlich gemittelte Schadstoffkonzentrationen (Balken) verglichen mit den gesetzlichen Grenzwerten im Stationärbetrieb (punktiert) sowie den effektiven Stationäremissionen (schwarzer Balken).

5.5 Diskussion und Schlussfolgerung

Während das Aladin II System im stationären Betrieb jegliche gesetzlichen Grenzwerte weit unterschreitet, emittiert es mit den Einstellungen für den Stationärbetrieb während dem Kaltstart erhebliche Schadstoffmassen. Die Kombination einer abgastemperaturabhängigen Anpassung des Zündwinkels (SA Strategie) sowie des Vorgabelambdawertes (AFR Strategie) führt zu einer erheblichen Verringerung der Rohemissionen sowie einer Verkürzung der Zeit tim was entsprechend zu einer massiven Verringerung der akkumulierten NOX- und THC-Masse während eines stündigen Kaltstarts führt. Im Falle von NOX bedeutet dies eine Verringerung um 82%. Einzeln angewandt bringt die SA Strategie einen etwas grösseren Vorteil (-67% NOX) als die AFR Strategie (-54% NOX). Der Einbau eines elektrisch beheizbaren Katalysators (EHC) bringt bezüglich Schadstoffmasseneinsparung nur im Referenzfall, wo keine Strategie angewendet wird, eine merkliche Verbesserung (-25% NOX). Sobald jedoch eine der beiden - oder beide - Strategien aktiv sind, ist ein Mehrwert des EHC's kaum mehr erkennbar. Da die Implementierung der beiden Strategien im Gegensatz zum Einbau des EHC's kaum Kosten verursachen wird empfohlen diesen nicht standardmässig in den Aladin II Anlagen einzubauen, jedoch unbedingt die Kombination der Strategien zu implementieren. Diese Strategien können auch unabhängig vom Produkt in jedem stöchiometrisch betriebenen BHKW mit ausreichend genauer Lambdaregelung vom Hersteller implementiert werden.

Der LRV Grenzwert der CO Emissionen wird unter Anwendung der beiden Kaltstartstrategien im zeitlichen Mittel sogar über einen stündigen Kaltstart um das 8.9-Fache unterschritten. Dies obwohl die mittleren CO Emissionen in diesem Fall 12% über jenen des Referenzfalls liegen, was von der Anwendung der AFR Strategie herrührt. Die THC Emissionen werden im Kaltstart zeitlich gemittelt mit der Kombination der beiden Strategien gegenüber dem Referenzfall um 60% reduziert, während letztere den in Deutschland diskutierten künftigen Grenzwert bereits um rund das 10-Fache unterschreitet. Aus



diesen Gründen wurde der Fokus beim Entwickeln der besagten Strategien auf die Minimierung der NOX Emissionen gelegt.

Bezüglich THC Emissionen zeigt nachfolgende Betrachtung, dass die emittierte Methanmasse während eines stündigen Kaltstarts gegenüber der durch Verbrennung unvermeidbar produzierten CO2-Masse vernachlässigt werden kann: Bei einem Durchschnittsverbrauch von 0.45g/s Methan werden bei vollständiger Verbrennung 1.23g/s CO2 produziert. Während t_{lim} werden 80% (Fall D) bis 95% (Referenzfall A) der über eine Stunde akkumulierten THC Masse ausgestossen. Unter Berücksichtigung eines CO2-Äquivalentfaktors von 32 [16], machen die THC Emissionen maximal 2.9% der während dieser Zeit produzierten CO2 Emissionen aus. Dehnt man die Betrachtung auf eine Stunde Laufzeit aus, verringert sich der Anteil der THC Emissionen auf gerade mal 0.3% (Fall D) respektive 0.7% im Referenzfall A.

Bei einer Überarbeitung des Abgasnachbehandlungssystems sollte aus verschiedenen Gründen der Katalysator so nahe wie möglich an den Motor versetzt werden. Einerseits verkürzt sich dadurch die Aufwärmzeit und somit t_{lim} noch weiter. Andererseits können so auch die thermischen Verluste im Abgastrakt verringert werden, weil die Gesamtstrecke zwischen Motor und Abgaswärmetauscher dadurch verkürzt werden kann. Dies wiederum wirkt sich auch positiv auf die Temperaturen im Innern des Anlagengehäuses aus. Nebst den erwähnten positiven Eigenschaften, beeinflusst die Position des Katalysators die Druckschwingungen im Abgastrakt und somit den Füllgrad und damit die Leistung des Motors. Eine Simulation hat ergeben, dass die mechanische Leistung bei einer Verschiebung des Katalysators innerhalb 550mm zwischen 7.1 und 8.0 kW variiert. Bei einer maximalen Verschiebung um 550mm nach vorne ändert sich die Leistung von 7.9 auf 7.7kW, was unbedingt in Kauf genommen werden soll um sich die oben erwähnten Vorteile zu sichern.



6 Ölentwicklung

(Bucher AG Motorex)

6.1 Einleitung

Der Schweizer Schmiermittelmarkt ist stark umkämpft! Über 50 Mitbewerber teilen sich einen stagnierenden Inlandbedarf von 43'000 t auf. Zu den Anbietern zählen auch die mächtigen Multinationalen Gesellschaften, wie Shell, ExxonMobil, BP Castrol, TOTAL, Chevron, ENI-Agip usw. Diese Kolosse haben eigene Rohöl-Förderanlagen und kontrollieren die Materialflüsse vom Bohrloch bis zum Zapfhahn an der Tankstelle. Sie verfügen über eigene Laboratorien zur Entwicklung sowie Produktionsanlagen zur Herstellung von chemischen Zusätzen, sog. "Additives". Die Schmierstoffe in Motor und Antriebsstrang werden immer anspruchsvoller. Bis eine Formulierung von einem Fahrzeughersteller zugelassen ist, sind umfangreiche und kostspielige Labor- und Praxistests zu erfüllen. Multinationale Gesellschaften versuchen nun, zusammen mit den grossen Motorenherstellern den Markt weltweit abzuschotten. Die immensen Kosten der Motoren- sowie Getriebe-Prüfstände werden von den multinationalen Basisöl- und Additives-Herstellern übernommen und die Fahrzeug-Hersteller erteilen die Freigabe nur exklusiv für eine namentliche Formulierung. Als "kleine" unabhängige Schweizerfirma ist es oft sehr schwierig und kostspielig, ebenfalls eine Homologation zu erhalten. Zudem schliessen z.B. VW/AUDI, BMW, Daimler-Benz, VOLVO, PSA usw. europaweite Rahmenverträge mit den multinationalen Erdölgesellschaften ab und erhalten für jedes verkaufte kg Schmiermittel eine Kickback-Entschädigung.

Als MOTOREX versuchen wir deshalb, die freien Schmiermittel-Nischen in der Schweiz und im Ausland mit selbst entwickelten Formulierungen zu erobern. Um das notwendige Know-how zu vertiefen, suchen wir auch den Kontakt zu der ETHZ und zu der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA in Dübendorf. Speziell im Segment der Gasmotoren für stationäre und mobile Anwendungen sehen wir gute Chancen.

6.2 Beschrieb Arbeitspaket "Entwicklung eines Longlife-Leichtlauf-Schmieröls für Gasmotoren"

Die zuverlässige Schmierung von gasbetriebenen Motoren stellt spezielle Anforderungen an das Motorenöl, die von einem marktüblichen Standard-PKW-Motorenöl nicht erfüllt werden.

Die rund 10 - 20°C höheren Temperaturen bei Gasmotoren sowie die fehlende Kühl- und Schmierwirkung eines flüssigen Treibstoffes bilden nur einen Teil davon. Bei der Verbrennung von Erdoder Biogas entstehen gefährliche saure Verbrennungsrückstände, wie SOx und NOX (Schwefel- und Stickoxide), die schnellstmöglich neutralisiert werden müssen, um Korrosionsschäden im Motorenraum und in den Lagern zu verhindern. Die heute weltweit eingesetzte Additives-Technologie zur Formulierung von Motorenölen ist seit Jahrzehnten grundsätzlich unverändert. Es werden Calcium- und Magnesium-Sulfonate zur Neutralisation verwendet. Für den Verschleiss-Schutz werden zusätzlich EP-Additives auf Zink-, Phosphor- oder Schwefel-Basis eingesetzt. Diese teilweise schwermetallhaltigen Substanzen können die Abgas-Nachbehandlung sehr negativ beeinflussen. Geschmiert werden Blockheiz-Kraftwerke heute mit normalen Standard-Viskositäten SAE 15W/40 und SAE 10W/40. Leichtlauf-Motorenöle sind (noch) nicht vorgesehen und von den Herstellen der Aggregate auch nicht homologiert.



6.2.1 Arbeitspaket 1.1 Projektvorbereitung, Beschaffung und Verifizierung der Spezifikationen

- Verifizierung Spezifikation (Viskosität, HTHS-Wert, Vorgaben Additives, Serviceintervalle, Überprüfung Spezifikationen mit verwendetem Treibstoff sowie Abgasnachbehandlungssystem
- Festlegung Referenzöl, Schaffung klarer Ausgangslage.

ALADIN II wird durch einen Serienmotor von Polaris angetrieben. Da dieser Serienmotor keine Erdgasversion kannte, konnten wir uns nicht auf entsprechende OEM-Schmierstoffvorgaben abstützen. Die Auswertungen der Motorendaten ergaben eine "Referenz-Viskosität" von SAE 40 (bei 100 °C) mit einem synthetischen Basisfluid. Der von den meisten OEM geforderte HTHS-Wert für Erdgas-Treibstoff liegt bei 3.5 mm2/s oder grösser. Weitere wichtige Ölkenndaten sind auch S, P, Aschegehalt und TBN, welche vornehmlich durch die Additivierung bestimmt werden. Wir orientierten uns an den OEM-Vorgaben MAN 3271-2 bzw. 3271-4 sowie Jenbacher. Diese beiden OEMs verfügen über Praxiserfahrungen mit Erdgas betriebenen Motoren in höheren Leistungssegmenten, kombiniert mit Abgasnachbehandlungssystemen. Zusätzlich wurde für dieses Projekt bei MOTOREX ein separater Versuchsaufbau entwickelt. Dieser ermöglichte eine differenzierte Vorabtestung verschiedener Formulierungen und ersparte aufwändige und zeitintensive Testläufe auf teuren Motorprüfständen. Unser Augenmerk galt der Simulation von Alterungsprozessen, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit sowie die Einsatzzeit des Motorenöls haben. Die Ausgangslage für eine Motorenöl-Entwicklung war soweit geschaffen, das Ausgangsprodukt mit den dazu notwendigen Rohstoffen festgelegt. Rechtzeitig zum Versuchsbeginn stand das gewählte Motorenöl in ausreichender Menge zur Verfügung. Als Ausgangsprodukt (Referenzöl) wurde MOTOREX EVOLUBE ULTRA SAE 40 festgelegt.

6.2.2 Arbeitspaket 1.2 Evaluation der Schmierstoffprüfmethode, Screeningtest

- Experimenteller Oxidationstest bei MOTOREX
- DSC Oxidationstest nach CEC IL-85 B, externes Labor
- Tribologische Tests bezüglich Reibwert, Verschleissverhalten und Materialverträglichkeiten, EMPA Dübendorf
- Festlegung der Analytik, Überwachung SOLL- / IST-Werte



Experimenteller Oxidationstest bei MOTOREX

Wirkung / Testbedingungen: konstanter Luftfluss 10l/h;180°C; 50ml Probe





Abb. 36: MOTOREX Versuchsaufbau Oxydationstest

Messgrössen:

- A. Oxidationsstufe: C-O-oscillation bei 1710 cm-
 - 1. Indikation für organische Oxidationsprodukte
- B. TBN: mgKOH/g: Saure Produkte nehmen zu während der Überschuss an Base (TBN Werte) sich durch die Neutralisation verringert.
- C. TAN: mgKOH/g: Säurezahl tief zu Beginn erhöht sich durch Oxidation

TBN = total base number = Puffer basisch

TAN = total acid number = Säureprodukte durch Oxidation

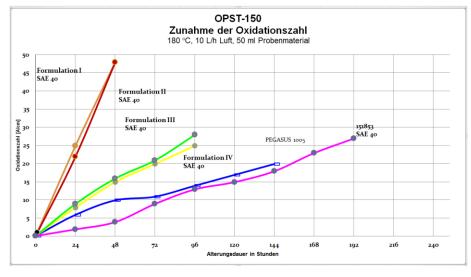


Abb. 37: Resultat EVOLUBE ULTRA SAE 40 (pink)



DSC Oxidationstest nach CEC IL-85 B, externes Labor

Der DSC Oxidationstest nach CEC IL-85 B wurde im externen Labor durchgeführt.

Oxidationsinduktionszeit (Minuten)	mind. 35 für normalen Ölwechselabstand	CEC L-85-T-99
	mind. 100 für normalen Ölwechselabstand	GEC F-00-1-99

Tab. 8: p-DSC-Test

Messbedinungen:

Tiegel: PDSC für dynamische Methoden

Temperatur: 40° bis 350° Celsius Heizrate: 5° Celsius pro Minute Medium: 10.7 bar Sauerstoff

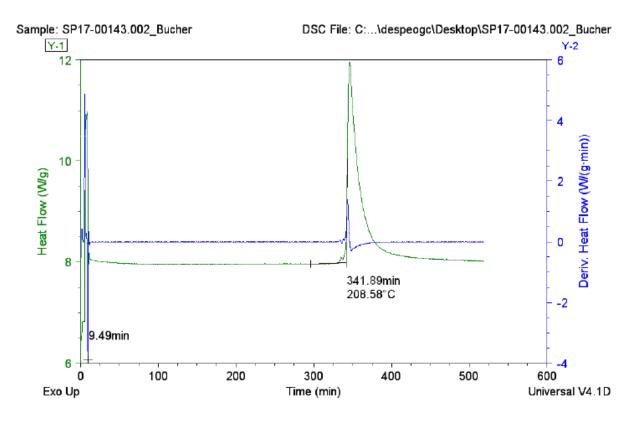


Abb. 38: Resultat DSC Oxidationstest nach CEC IL-85 B, externes Labor

Beim Test wurde ein Wert von 342 Minuten erreicht. Das Öl ist demzufolge als sehr oxidationsstabil einzustufen, vor allem auch im Vergleich zu andern gängigen und bekannten Gasmotorenölen.



Tribologische Tests bezüglich Reibwert, Verschleissverhalten und Materialverträglichkeiten, EMPA Dübendorf

Bereits zum Projektstart wurden wir mit nicht stabil laufenden Motoren (siehe gleichnamiges P&D-Projekt) konfrontiert. In der Folge mussten die Ventile und Ventilsitze bezüglich Form und Wahl der Materialien verändert werden. Dies bewog uns, die tribologischen Reibwertversuche nicht bzw. vorerst nicht durchzuführen. Reibwertversuche liefern wichtige Erkenntnisse für die Wirkung von Basisölen und Additiven. Insbesondere bei Versuchen, die Viskosität abzusenken kann dadurch eine Vorselektion geeigneter Schmierstoffe getroffen werden. Die eingesetzten Metalle müssen jedoch festgelegt sein, da sonst die Anzahl möglicher Kombinationen nicht mehr genügend einschränken lässt.

Festlegung der Analytik, Überwachung SOLL- / IST-Werte

Um die Analysen vergleichbar zu machen wurde ein fixes Intervall in die Motorsteuerung einprogrammiert. Die Anlage schaltete jeweils automatisch eine ½ Stunde vor Erreichen der definierten Betriebsstunden aus und es wurde eine Meldung an den Anlagebetreiber gesendet. Der Anlagebetreiber konnte die Anlage starten und zum exakt definiert Zeitpunkt das Öl in warmen Zustand entnehmen. Um Verwechslungen im Labor auszuschliessen, wurden für die Ölmuster-Entnahme pro Anlage vordefinierte Analysesets (mittels Anlagenserien-Nummer) erstellt. Auf dem Begleit-Formular konnte der Anlagenbetreiber nur noch die Betriebsstunden und das Entnahmedatum eintragen. Die erste Analyse nach nur einer Betriebsstunde diente zur Festlegung der Referenzwerte, die Analysewerte der weiteren Entnahmen zeigten den Verlauf / die Veränderungen. Die detaillierten Analyseberichte finden sich im Anhang, Kapitel 9.

Ölprobe	Intervall / h	Motorstunden / h	Timetable
1. Analyse	1	1	Tag
2. Analyse	50	50	1. Tag
3. Analyse	50	100	4. Tag
4. Analyse	100	200	8. Tag
5. Analyse	100	300	12. Tag
6. Analyse	200	500	20. Tag
7. Analyse	500	1000	41. Tag
8. Analyse	500	1500	62. Tag
9. Analyse	500	2000	83. Tag
10. Analyse	500	2500	104. Tag
11. Analyse	500	3000	125. Tag
12. Analyse	500	3500	145. Tag
13. Analyse	500	4000	166. Tag

Tab. 9: Ölanalyse Entnahmeplan



Messmethoden:

Messgrösse	Methode	Gerät
Viskosität	ISO 3104	Anton Paar Stabinger Viskometer
Wassergehalt	ISO 12937	Karl Fischer Culomat Ofen
Oxidationsprodukte	IR	Infrarot Spektrum
Dispergierende Wirkung	DIN ISO 6614	
Initial pH (IpH)	Mobil	
TAN	ASTM D 664	Titrator Mettler T70
TBN	DIN ISO 3771	
Elemente	AES	Spectro M

Tab. 10: Messmethoden

6.2.3 Arbeitspaket 1.3 Test verschiedener Formulierungen

- Durchführung Tests und Analysen nach festgelegter Prüfmethodik
- Überprüfung Viskositäten SAE 5W/30, 0W/20, 0W/16
- Festlegung und Herstellung der Formulierungen (en)

Die Zielsetzung vom Arbeitspaket 1.3 bestand in der Evaluation von 3 – 4 Öl-Formulierungen für Testläufe auf dem ETHZ Prüfstand (Festlegung von Formulierungen für den Langzeiteinsatz sowie der Parameter für deren Begleitanalysen). Wie bereits beschrieben blieb innerhalb des Projektes Aladin II mit den bekannten Verzögerungen aus dem Teilprojekt P&D zu wenig Zeit für Versuche mit abgesenkten Viskositäten. Das Arbeitspaket 1.3 konnte so nicht bearbeitet werden.

6.2.4 Arbeitspaket 1.4 Test auf Prüfstand ETHZ (Abgas- Verbrauchsmessungen), Start und Langzeittest von BHKW-Demonstration-Objekte (Standorte MOTOREX, HOVAL, SWISSAUTO

Eignungstests auf Motorenprüfstand

Die ursprüngliche Planung bestand darin, mit den 5 Prototypen (PT1 – PT 5) aus dem P&D-Projekt Eignungs- und Langzeittests für die Ölentwicklung zu fahren. Bezüglich Projektdetails P&D verweisen wir auf den entsprechenden Bericht. Nachdem die Motorenprobleme gelöst waren, konzentrierte sich die Versuchsreihe für die verbleibende Zeit auf den Betrieb der beiden Dauerläufer PT 3 und PT 4 mit dem Referenzöl. So konnten immerhin noch über 500 h beim PT 3 resp. über 1000 h beim PT 4 erreicht werden. Für eine aussagekräftige Ölanalyse war dies aber nicht mehr ausreichend. Die entsprechenden Auswertungen der Öluntersuchungen aus den Anlagen PT 1, PT3 und PT 4 sind im Anhang 9 (Abb. 40 - Abb. 45) zu finden.



6.2.5 To do's for the Future / Pendenzen:

Die eingesetzte MOTOREX Gasmotorenöl-Formulierung vermag auf den ersten Blick den erhöhten Anforderung durch den Gasbetrieb standzuhalten. Der erste Motor erreichte im Juli 2018 1000h ohne Motorenölwechsel, was bereits eine beachtliche Leistung darstellt. Die Ventilspielproblematik mit den daraus resultierenden notwendigen Umbaumassnahmen verursachten jedoch ungeplante Projektverzögerungen und Stillstandzeiten. Die Arbeitspakete der eigentlichen Ölentwicklung konnten nicht oder nur teilweise bearbeitet werden. Eine weitergehende Ölentwicklung mit versuchsweise abgesenkten Viskositäten war nicht möglich. Es konnten vor allem keine zusätzlichen Erkenntnisse über die Lebensdauer und Stabilität mit abgesenkten Viskositäten gewonnen werden. Die noch bescheidenen Einsatzstunden des Motorenöls bei den jeweiligen Prototypen (PT1 200h; PT3 500h; PT4 1000h) zeigten noch zu wenig eindeutige Veränderungen. Der angestrebte Wechselintervall von einem Jahr bei ca. 2000 Betriebsstunden konnte nicht gefahren werden. Es scheint aber möglich zu sein, mit geeigneten Anpassungen in der Formulierung sowie einer Vergrösserung des Ölvolumens den geforderten Serviceintervall erreichen zu können.

Für die Entwicklung eines Longlife-Leichtlauf-Schmieröls sind somit weitere ausgedehnte Versuchsreihen mit entsprechenden Ölanalysen notwendig. Um den Wirkungsgrad der Gesamtanlagen durch ein geeignetes Motorenöl positiv beeinflussen zu können, werden wir bei der Weiterentwicklung auf Formulierungen mit Fuel Economy–Potenzial setzen. Hierfür existieren passende, niederviskose Basisöle und Additives-Pakete, die passende Abstimmung ist Sache weiterer Test. Alle 5 Prototypen stehen der ETHZ nach Abschluss der beiden Projekte ALADIN II F&E und P&D für weitere Projekte zur Verfügung. MOTOREX ist interessiert, kommende Projekte mit Motorenöl und Analysen zu unterstützen.



7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zielsetzung des Projekts Aladin II bestand in der Entwicklung eines gasbetriebenen, hochflexiblen mikro-Blockheizkraftwerks, das durch zielgerichtete Optimierungsmassnahmen und unter Einsatz kosteneffizienter Technologie das Potential 1. zur Minimierung des Emissionsverhaltens und 2. zur Maximierung der thermischen und elektrischen Effizienz demonstriert. Das Blockheizkraftwerk sollte auf einen autonomen Betrieb mit Schnittstellen zur Fernwartung ausgerichtet werden. Kontinuierliche Analysen des Motoröls sollten die Entwicklung eines spezifischen, wartungsarmen Motoröls ermöglichen und somit eine Maximierung der Wartungsintervalle bewirken.

Die im Rahmen des Projekts entwickelte Anlage im Vorprototypenstadium wird unter Volllast betrieben und produziert eine elektrische Leistung von 7.5kW_{el.} mit einem elektrischen Wirkungsgrad von $\eta_{el} \geq 32\%$ und einem thermischen Wirkungsgrad von $\eta_{th} \geq 56\%$. Je nach Betriebszustand wird eine Stromkennzahl von bis zu 0.53 erreicht. Im Stationärbetrieb unterschreiten die Schadstoffkonzentrationen die gesetzlichen Grenzen der Luftreinhalteverordnung um das 20-fache (CO) bis 25-fache (NOx). Das Emissionsverhalten während des Kaltstarts wurde durch dedizierte Regelungsstrategien optimiert, sodass die für den Stationärbetrieb gültigen Limite der Luftreinhalteverordnung sogar für diesen Betriebsfall um das 8.9-fache unterschritten werden.

Zur Maximierung der Anlageneffizienz unter Kaltstartbedingungen und während des stationären Betriebs wurde der hydraulische Aufbau fortlaufend optimiert und durch zielgerichtete Regelungsalgorithmen ergänzt. Das Erreichen der Betriebstemperaturen konnte durch diese Massnahmen um 60% (Motor), 25% (Öl) und 25% (Heizkreisvorlauf) verkürzt werden.

Auf der verbrennungsmotorischen Ebene wurde eine Regelung des Luftverhältnisses entwickelt und implementiert, die zum Ziel hatte, den besonderen Anforderungen an eine kontinuierliche Gaseindüsung unter niedrigem Druck gerecht zu werden. Die implementierte Lösung kann sowohl unter regelungstechnischen Gesichtspunkten stabil und genau einem Sollwert folgen, als auch Störungen effektiv ausregeln. Insbesondere die nicht konstante Qualität des Erdgases bewirkt, dass natürliche Schwankungen im optimalen Verhältnis von Brennstoff zu Luft auftreten. Somit kann kein allgemein gültiger Sollwert definiert werden. Die entwickelte und abgestimmte Lösung unter Berücksichtigung des Luftverhältnisses nach dem Katalysator und die damit verbundene Korrektur des Sollwerts für das Verbrennungsluftverhältnis wirkt diesen Störungen effektiv entgegen und stellt unter allen Betriebsbedingungen sicher, dass die oben aufgeführten Werte zum Emissionsverhalten keinen signifikanten Schwankungen unterliegen.

Das Aladin II – Blockheizkraftwerk wurde mit einer speziell entwickelten Fernwartungs- und Datensicherungskonfiguration versehen, die einen optimalen Arbeitsfluss zu Forschungszwecken zwischen den Feldern Diagnose, Service und Entwicklung gewährleistet. Als Grundlage dient die Entwicklung eines massgeschneiderten Sicherheitskonzepts, das einen sicheren und autonomen Betrieb der Anlage ermöglicht.

Die programmierten, automatisierten Abläufe sind für die Weiterentwicklung des Motoröls unumgänglich, da mit diesen Massnahmen vordefinierte Zeiten zur Entnahme von Ölproben eingehalten werden konnten. Im Rahmen des Projekts konnte keine neue Motorölformulierung getestet werden, da schlussendlich zu geringe Laufzeiten erreicht wurde. Die Analysen der über die Projektdauer generierten Ölproben offenbart jedoch, dass die anfänglich eingesetzte Formulierung den Bedingungen grundsätzlich gewachsen ist. Um eine weitere Erhöhung der Betriebsdauer des Öles zu erreichen soll das Ölvolumen in einem nächsten Schritt auf ca. das 10-fache des Serienmotors angehoben werden. Dies ist ein üblicher Faktor bei anderen Gasmotorherstellern. Aktuell liegt die Ölmenge beim ca. 4-fachen der Serienmotorölmenge.



Das Aladin II – Blockheizkraftwerk wurde mit der Ausrichtung entwickelt, eine nachfolgende Weiterentwicklung zur Serienreife zu ermöglichen. Neben der Verwendung von kosteneffizienten Bauteilen und Systemen wurde insbesondere auf die spätere Einsetzbarkeit und Konformität gemäss Industriestandards geachtet. Damit ist das Aladin II – Blockheizkraftwerk grundsätzlich für eine späteren Serieneinsatz geeignet. Notwendige Optimierungsschritte sind vornehmlich in einer weiteren Kostenreduktion und einer Weiterentwicklung des hard- und softwaretechnischen Aufbaus mit stärkerem Fokus auf einen Serieneinsatz zu nennen. Insbesondere die Fernwartung und Datensicherung, aber auch die Regelalgorithmen und der konstruktive Aufbau sind auf die Anwendung im Forschungskontext ausgerichtet und entsprechend realisiert. Durch die frühzeitige Festlegung auf eine potentielle Weiterentwicklung sind jedoch kein grundlegender Neuaufbau bzw. fundamentale Neuentwicklungen zu erwarten. Konkrete Beispiele für Weiterentwicklungsmassnahmen sind die Reduktion des sensortechnischen Aufbaus, die Implementierung einer bedarfsgerechten Regelung, die Ausgestaltung der Schnittstelle zur Fernsteuerung durch Netzbetreiber und die thermische sowie akustische Optimierung der Anlagenkapselung.

Innovation ist Chefsache!

Gedanken zum Projekt von Herrn Peter Regenass, Mitinhaber und VR-Präsident der BUCHER AG LANGENTHAL, MOTOREX Schmiertechnik

Als "Delegierte" unseres dazu ins Leben gerufenen Innovations-Teams klopften der VRP Peter Regenass-Bucher sowie der CEO Edi Fischer im Jahr 2010 bei Prof. Dr. Konstantinos Boulochos an der ETHZ an, um die Möglichkeiten zu diskutieren. Wir waren schon damals überzeugt, und sind es noch heute, dass es technisch realisierbare Lösungen für den Ersatz von Fossilen Treibstoffen gibt. Dabei stehen erneuerbares Bio- oder E-Gas im Vordergrund. Als Projektziel war definiert, ein Leichtlauf-Longlife-Schmieröl für Stationär-Gasmotoren mit Abgasnachbehandlung zu entwickeln.

Unser Prototyp ALADIN II dreht sich Tag und Nacht! Das Micro-Blockheizkraftwerk produziert wacker elektrischen Strom und Wärme und die ehrgeizigen technischen Vorgaben werden eingehalten. Mehrere Aggregate sind bereit, um nach einer Überarbeitung den Menschen weltweit zu "dienen". Die Beteiligten konnten neue, spannende Erkenntnisse gewinnen. Es wurde Neuland betreten und offene, konstruktive Zusammenarbeiten führten zu nachhaltigen Kontakten zwischen der Eidg. Techn. Hochschule Zürich ETHZ, dem Bundesamt für Energie BFE und den beteiligten Firmen. Alle Partner des Projektes "ALADIN" haben für ihren Einsatz, ihre Begeisterung und für die erreichten Leistungen ein herzliches Dankeschön verdient. Es war eine spannende Zeit und es wurden neue Freundschaften geschlossen. Der gute Geist Dschinn in der Öllampe ist bereit zu neuen Taten – wer wird an ihr reiben?





8 Referenzen

[1] Aladin I Schlussbericht

Auslegung und Realisierung von WKK-Anlagen mit "Null" – Schadstoffpotential unter besonderer Berücksichtigung biogener Energieträger Juni, 2014

[2]: Aladin II P&D Jahresbericht 2017

SI/501300-1

Dezember 2017

[3]: P. Vögelin et al..

System modelling for assessing the potential of decentralised biomass-CHP plants to stabilise the Swiss electricity network with increased fluctuating renewable generation Schlussbericht, Januar 2016

[4]: D. Mauzerall, B. Sultan, N. Kim, D. Bradford

NOX emissions from large point sources: variability in ozone production, resulting health damages and economic costs

Atmospheric Environment, Volume 39, Issue 16, 2005, Pages 2851-2866

[5]: H. Wagner und R. Zellner

Die Geschwindigkeit des reaktiven Abbaus anthropogener Emissionen in der Atmosphäre September 1979

[6] Wikimedia Foundation

http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Methan

Abrufdatum: 08.12.2017

[7] Der Schweizer Bundesrat

https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/index.html

Abfragedatum: 08.12.2017

[8] Stadt Zürich

https://www.stadt-zuerich.ch/portal/de/index/politik_u_recht/stadtrat/geschaefte-desstadtrates/stadtratsbeschluesse/2011/Dez/StZH_StRB_2011_1588.html Abfragedatum: 08.12.2017

[9] C. Bum In, S. Kim, C. Kim, W. Cho, Kia Motors Co. Catalyst Technology Satisfying Low Emission of Natural Gas Vehicle February 24-27, 1997

[10] K. Kollmann, J. Abthoff, W. Zahn, M.-B. Ag, H. Bischof, and J. Göhre, Secondary Air Injection with a New Developed Electrical Blower for Reduced Exhaust Emissions

SAE Technical Paper, 1994.

[11] Continental EMITEC GmbH

http://www.emitec.com/technik/katalysatortraeger/emicat/

Abrufdatum: 08.12.2017



[12] S.D. Sharma et al. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review International Journal of Green Energy, 2: 1-56, 2005

- [13] Murat M. Kenisarin
 High-temperature phase change materials for thermal energy storage
 Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 3, Pages 955-970, April 2010
- [14] D. Laing, T. Bauer, W.-D. Steinmann, D. Lehmann
 Advanced High Temperature Latent Heat Storage System Design and Test Results
 The 11th International Conference on Thermal Energy Storage Effstock 14-17, June 2009
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Entwurf zur Anpassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes– Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) Stand 09.09.2016, 2016
- [16] M. Etminan et al. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing Geophysical Research Letters, Vol 43, Issue 24, Pages 12614-12623, 2016



9 Anhang

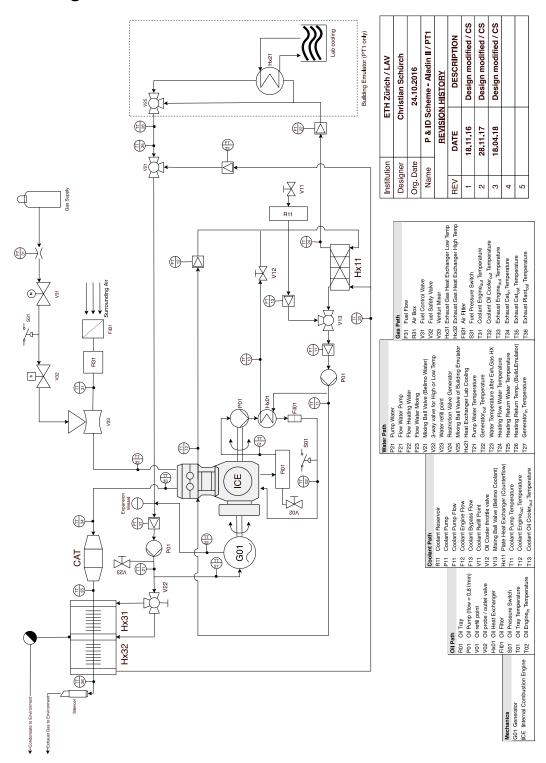


Abb. 39: Anlagenschema der ETH Laboranlage



Analysen_PT1_167 ETH

Letzte Beurteilung:

Die Werte sind gegenüber der letzten Analyse praktisch unverändert. Der vorgeschriebene Viskositätsbereich wird eingehalten. Der gemessene Wassergehalt ist für diesen Einsatz in Ordnung. Der TAN-Wert ist gering und der TBN-Wert weist noch Reserven auf. Der Eisenverschleiss ist erhöht, der Natriumgehalt leicht angestiegen.

Der Motor kann mit diesem Motorenöl problemlos weiterbetrieben werden.

Oelanalyse Datum Entnahme Stunden				1 07.04.16 1h	2 07.04.16 10h	3 07.04.16 1h	4 07.04.16 10h	5 07.04.16 0.5h	6 15.09.16 4.7h	7 03.04.17 50h	8 03.08.17 100h	9 2.11.2017 200h
Analyse	Einheit	Methode	Referen	nz Resultat								
Analysenbericht Nr.				16-0849.1	16-0849.2	16-0849.3	16-0849.4	16-0849.5	16-0849.6	16-0849.7	16-0849.8	16-0849.9
Viskosität, 100 °C	[mm²/s]	ISO 3104		12.5 13	13.1	13	13	12.9	12.9	12.9	13	13.1
Viskosität, 40 °C	[mm²/s]	ISO 3104		113.2	114.5	113.6		111.6	111.9	112.7	114.2	115.6
Wassergehalt coulom.140°C	[%]	ISO 12937	< 0.2	0.03	0.02	0.04	0.05	0.05	0.03	0.021	0.042	0.004
Glykole, qualitativ				negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ
Oxidationsprodukte	[A/cm]	IR		0	0	0	0	0	2	0	1	1
Dispergierende Wirkung				gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Initial pH (IpH)		Mobil	> 4.0	7.4	6.7	6.6	6.9	6.7	7	6.4	6.1	5.7
TAN	[mg KOH/g]	ASTM D 664		1.82	1.7	1.8	1.8	1.8	1.87	1.87	1.99	2.97
TBN	[mg KOH/g]	DIN ISO 3771	> 2.8	5.6	5.9	5.8	5.9	5.9	5.6	5.7	5.2	5.1
Eisen	[ppm]	AES	< 30	6	16	10	7	3	7	13	17	29
Aluminium	[ppm]	AES	< 10	2	3	1	1	1	1	2	4	8
Chrom	[ppm]	AES	< 10	1	1	0	1	0	1	2	3	3
Kupfer	[ppm]	AES	< 25	1	2	1	1	1	1	6	11	16
Blei	[ppm]	AES	< 20	0	0	0	1	1	1	4	2	0
Zinn	[ppm]	AES		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Silicium	[ppm]	AES		3	5	3	3	2	1	2	3	7
Natrium	[ppm]	AES	< 50	21	21	21	20	20	18	15	24	30

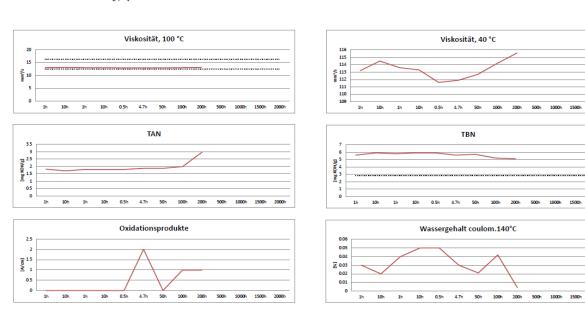


Abb. 40: Analyseergebnisse PT1 (1/2)

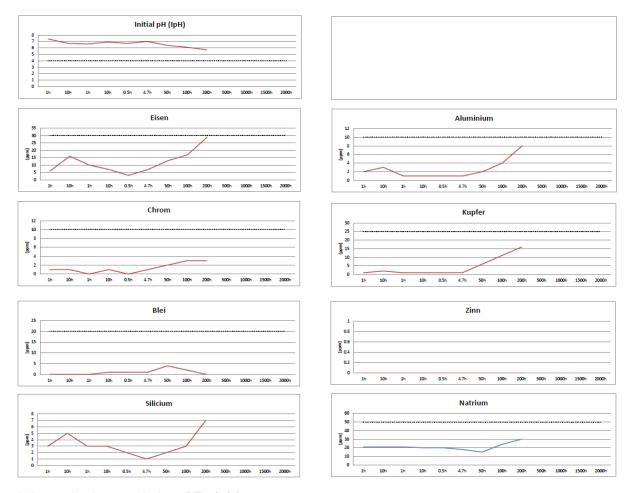


Abb. 41: Analyseergebnisse PT1 (2/2)



Analysen_PT3_166_DL 1

Letzte Beurteilung:

Der vorgeschriebene Bereich der Viskosität wird eingehalten. Der gemessene Wassergehalt ist für diesen Einsatz in Ordnung. Der Metallabrieb befindet sich innerhalb der Toleranzen. Eisen- und Kupferverschleisswerte sowie der Natriumgehalt sind leicht angestiegen, aber noch nicht kritisch. Der TAN-Wert ist gering und der TBN-Wert weist noch Reserven auf.

Der Motor kann mit diesem Motorenöl problemlos weiterbetrieben werden.

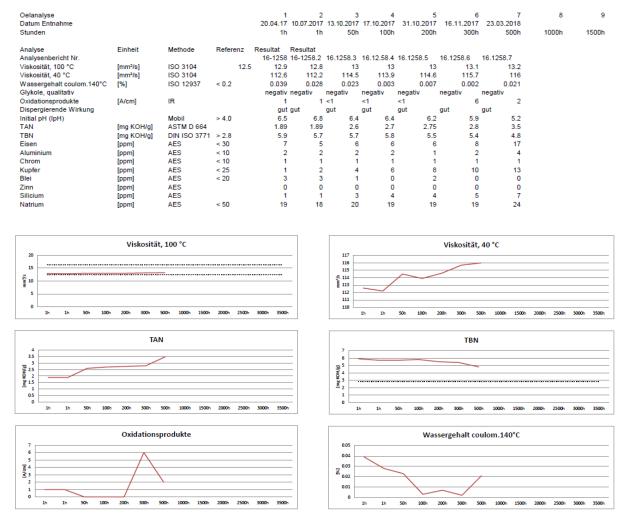


Abb. 42: Analyseergebnisse PT3 (1/2)

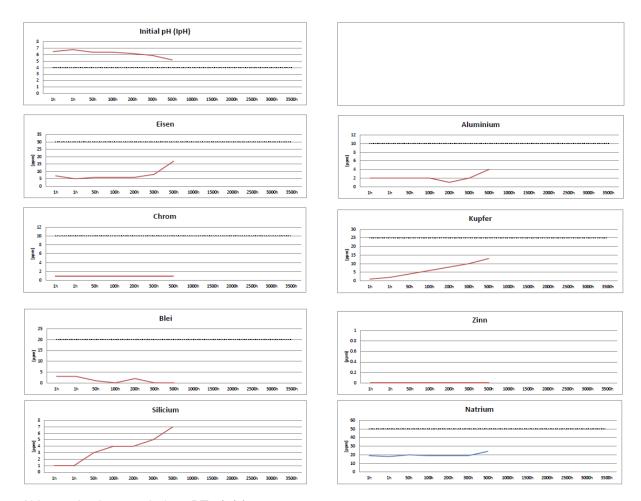


Abb. 43: Analyseergebnisse PT3 (2/2)



Analysen_PT4_165_DL 2

Letzte Beurteilung:

Der vorgeschriebene Bereich der Viskosität wird eingehalten. Der gemessene Wassergehalt ist für diesen Einsatz in Ordnung. Die Alterung ist leicht fortgeschritten. IpH Wert ist gesunken. Aber der TAN-Wert ist noch gering und der TBN-Wert weist noch Reserven auf. Der Metallabrieb befindet sich innerhalb der Toleranzen. Eisenverschleiss und Natriumgehalt sind angestiegen.

Der Motor kann mit diesem Motorenöl bis zur nächsten Analyse bei Erreichen von 1500h weiterbetrieben werden, danach entscheiden die nächsten Analyseresultate.

Analysen_PT4_165_DL 2

Oelanalyse Datum Entnahme 2 3 4 13.09.2017 20.09.2017 26.10.2017 6 7 19.12.2017 05.01.2018 Einheit Analyse Analysenbericht Nr. Viskosität, 100 °C Viskosität, 40 °C Wassergehalt coulom.140 Glykole, qualitativ Oxidationsprodukte 16-1259 16.1259.2 16-1259.8 ISO 3104 13.1 115.6 0.015 12.5 114.5 0.005 ISO 3104 ISO 12937 116 0.023 117 0.026 < 0.2 IR [mg KOH/g] [mg KOH/g] [ppm] [ppm] [ppm] [ppm] [ppm] [ppm] [ppm] [ppm] [ppm]

Abb. 44: Analyseergebnisse PT4 (1/2)

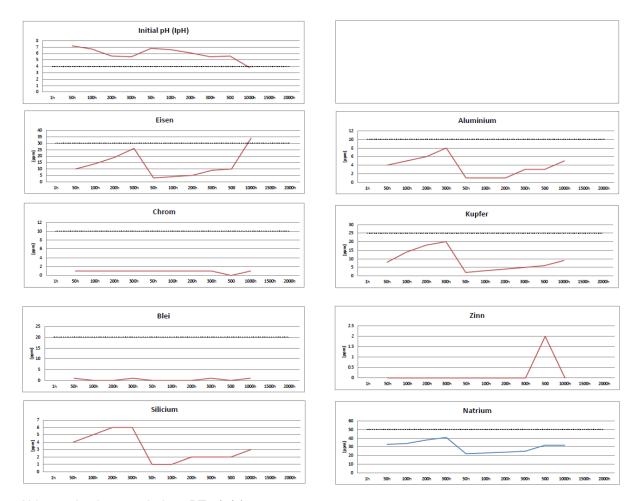


Abb. 45: Analyseergebnisse PT4 (2/2)