

# Ein neues Druckwellenladerkonzept für weniger Emissionen und mehr Effizienz

Dr. ETH Mario A. Skopil<sup>a,1</sup>

a Antrova AG  
Postanschrift (Hofwissenstasse 13, 8260 Stein am Rhein, Schweiz)

## Kurzfassung:

Der **Druckwellenlader (DWL)** ist eine Möglichkeit neben dem Turbolader und dem Kompressor einen Verbrennungsmotor aufzuladen. In diesem Paper soll ein neues Konzept vorgestellt werden welches Probleme der bisherigen Bauweise löst. Die Problematik der temperaturabhängigen Spiele zwischen Rotor und Gehäuse sowie die Regelbarkeit sollte damit wesentlich besser zu beherrschen sein, speziell wenn es um Benzin und Gasmotoren geht. Dies wird durch ein neues Lagerungskonzept mit Hilfe eines wassergekühlten Abgasgehäuses, einen mittig zweigeteilten Rotor und die Möglichkeit wie bei einer Registeraufladung einen der beiden gasdynamischen Zyklen abschalten zu können erreicht. Welche Vorteile sich gegenüber dem alten Konzept ergeben und welche Vorteile solch ein DWL im Allgemeinen hinsichtlich Effizienz und Emissionen bietet wird berichtet.

**Schlagworte:** Druckwellenlader 1; Emissionen 2; Effizienz 3; Gasmotor 4; Benzinmotor 5

---

<sup>1</sup> E-mail: [mail@antrova.com](mailto:mail@antrova.com), URL: [www.antrova.ch](http://www.antrova.ch)

# **A new pressure wave supercharger concept for less emissions and more efficiency**

**Dr. ETH Mario A. Skopil<sup>a,1</sup>**

a Antrova AG  
Address (Hofwisenstasse 13, 8260 Stein am Rhein, Schweiz)

## **Abstract:**

The Pressure Wave Supercharger (PWS) is one possibility beside a turbo-charger and a compressor to supercharge a combustion engine. In this paper a new concept will be shown which solves problems of the previous design. The problem of the temperature dependent gaps in between the rotor and the casings and the controllability should be much better to handle, especially together with petrol and gas engines. This is achieved by a new bearings concept with the aid of a water-cooled exhaust gas housing, a central divided two-part rotor and the ability to turn off one of the two gas-dynamic cycles like a register charging system. The advantages against the old concept and the advantages that such a PWS generally offers in terms of efficiency and emissions are reported.

**Key Words:** Pressure Wave Supercharger 1; Emissions 2; Efficiency 3; Gas Engine 4; Petrol Engine 5

---

<sup>1</sup> E-mail: [mail@antrova.com](mailto:mail@antrova.com), URL: [www.antrova.ch](http://www.antrova.ch)

# 1 Einleitung

Seit den 40er Jahren ist der **Druckwellenlader (DWL)** in Verwendung um Dieselmotoren aufzuladen. Damals startete die BBC in Baden Schweiz die Produktion eines DWL den sogenannten Comprex™ (Comprex ist inzwischen eine Warenmarke der Antrova AG). Erstmals wurden Druckwellenrotoranwendungen in den 1940er Jahren als Zusatzstufen für Lokomotiven Gasturbinen durch die Brown Boveri Company (BBC) entwickelt. Zwischen 1947 und 1955 stellte die ITE Circuit Breaker & Co in den USA unter Leitung von BBC einige Einheiten her und testete diese erfolgreich an Dieselmotoren [9]. Die Maschine selbst ist daher viel jüngerem Datums als der Turbolader, welcher inzwischen über 100 Jahre existiert [1]. Der DWL wurde hauptsächlich bei Opel und vor allem Mazda mit Erfolg verwendet und es wurde auch an Selbstläufern gearbeitet [14]. Nachteilig bei diesen nur vom Abgas angetriebenen Rotoren ist, dass zum Starten ein spezielles Luftventil gebraucht wird und dass sich die Drehzahl nie optimal einstellen lässt zumal ab einem gewissen Punkt der Rotor eingebremst werden muss damit die Drehzahl nicht zu hoch wird. Dieser Punkt wird bei den heutigen Aufladegraden mit viel Abgasenergie relativ bald überschritten. Mit einem Elektroantrieb lässt sich dieser Effekt aber nutzen indem Strom in die Batterie zurück gespeist werden kann. Obwohl das Konzept schon älter scheint, verheißt es doch gerade für die heutigen Anforderungen auch bei Benzinmotoren große Vorteile und sollte 2012 als elektrisch angetriebene Version (Hyprex; Kurz für Hybrid Comprex) sogar im Mercedes AMG A45 Verwendung finden. Hierzu wurden auch schon viele Untersuchungen in neuerer Zeit unternommen, siehe [2],[4],[10],[11],[12],[13]. Trotz der spektakulären Möglichkeiten und vieler Vorteile für das Downsizing Konzept [4],[5],[6],[7] hat sich der DWL bis jetzt wohl aus Kostengründen bei der Fertigung des Zellenrotors und den bestehenden konstruktiven Problemen nicht mehr durchsetzen können.

Aber wie ist die Situation anhand der neuen Randbedingungen für Emissionen durch den Gesetzgeber zu bewerten und kann ein neues DWL Konzept helfen die alten Nachteile zu überwinden? Das Problem, welches alle Verbrennungsmotorenentwickler haben sind die immer höheren Ansprüche an die Umweltverträglichkeit was natürlich auch mit hohen Kosten für die Abgasreinigung einhergeht. Hier könnte man mit Hilfe eines Aufladegerätes welches die Spielräume erweitert weiter gehen um noch mehr für die Umwelt herauszuholen.

Daher werden in der Folge zuerst die allgemeinen Vorteile und die prinzipielle funktionsweise geschildert und danach das neue Konzept im Vergleich mit dem alten aufgezeigt um die Verbesserungen klar heraus zu stellen.

Am Ende werden auch die Mess-Aktivitäten des Prototyps angesprochen welche vom Heissgasprüfstand bzw. Motorenversuch stammen um somit einen besseren Praxisbezug herzustellen und zu zeigen, dass hier ein beträchtlicher Aufwand betrieben wird.

## 2 Allgemeines

In diesem Kapitel wird der DWL in seiner Funktionsweise und dessen prinzipiellen Vorteilen vorgestellt.



Abbildung 2.1: Aktuelles Bild des Antrova AG Complex Prototyps auf einem Testmotor

### 2.1 Vor und Nachteile des DWL

#### **Vorteile:**

- Sehr schneller transienter Ladedruckaufbau
- Hoher Ladedruck schon bei niedrigen Motordrehzahlen

- Sein Antrieb dient nur zur Synchronisation des Laders zur Motordrehzahl (Powerless drive) und kann auch als Generator genutzt werden
- Lebenslang geschmierte Lager, keine Verschmutzung des Motoröls oder gar Motorölverlust
- Keine Drehzahlreserve nötig, der DWL gleicht jede Betriebshöhe perfekt aus.
- Der Lader absorbiert die Motorgeräusche bereits. Daher wird nur eine sehr einfache Auspuffanlage ohne Dämpfer benötigt
- Keine Pumpgrenze wie beim Turboverdichter vorhanden
- Sehr hohe Verdichtungswirkungsgrade, bei kleiner Motordrehzahl bzw. Durchsatz möglich
- Bauartbedingt kleiner Gegendruck der AGA, ermöglicht Senkung vom Kraftstoffverbrauch und ein günstiges Spülgefälle über den Motor, siehe Beispiel Abb.: 2.1.1
- Der Katalysator kann zwischen Motor und Lader angeordnet werden, gleichbedeutend mit sehr schnellem anspringen und wenig Emissionen. Es ist auch eine Variante für „Saubere Volllast“ möglich ohne Lambda 1 zu fahren.
- Sehr hohe AGR Raten sind einfach darzustellen.
- Gut für Downsizing geeignet

### **Nachteile:**

- Benötigter kleiner Gegendruck auf der Niederdruckseite verlangt grössere Auspuffquerschnitte. Gleiches auch auf der Luftansaugseite des Laders.
- Kaltstartverhalten des Laders, bei Benzinmotoren und Gasmotoren schwieriger zu beherrschen. Dank neuem Konzept deutlich verbessert.

- Matching komplizierter, kann aber heutzutage vorab mit Simulationssoftware wie GT Suite, AVL BOOST durchgeführt werden.
- Nachbrennen im Auspufftrakt war bei Benzinmotoren möglich. Dieses Problem ist mit dem neuen Konzept aber gelöst.

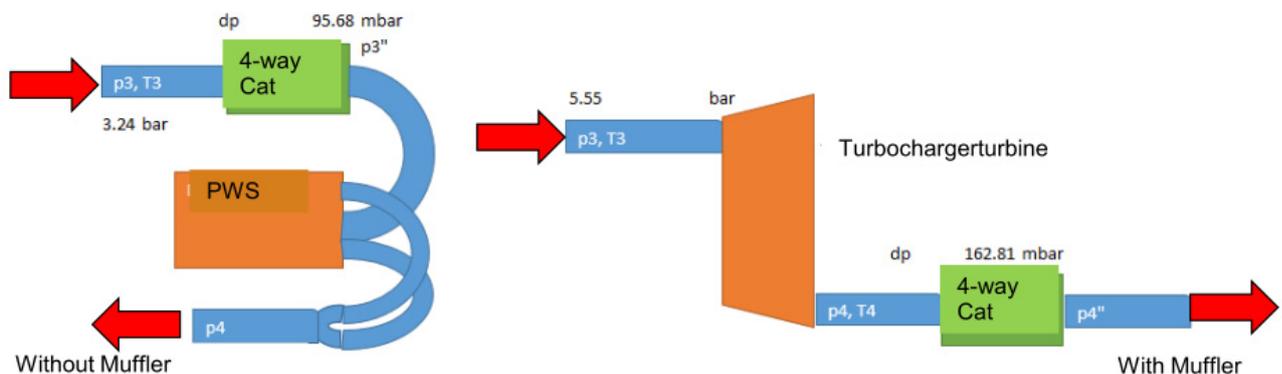


Abbildung 2.1.1: Beispiel warum beim Compress ein kleinerer Gegen-  
druck als beim Turbomotor zu erwarten ist.

## 2.2 Prinzipielle Funktion eines DWL

In einer reibungsfreien Strömung ohne einen Energieaustausch bedingt durch Wärmeleitung und Wärmeübergang werden Zustandsänderungen isentrop genannt und es gilt unter der Verwendung der Gasgleichung  $p = \rho * R * T$  und der Schallgeschwindigkeit  $a$  folgende Gleichungen.

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\kappa * R * T}$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{a}{a_0}\right)^{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\kappa}$$

Stellt man sich eine Störung in einer Strömung vor lassen sich aus den Erhaltungssätzen für Energie, Impuls und Masse mit Hilfe der Gasgleichung und der Schallgeschwindigkeit für eine instationäre Strömung folgende Gleichungen herleiten, welche auch den Ort und die Zeit berücksichtigen.

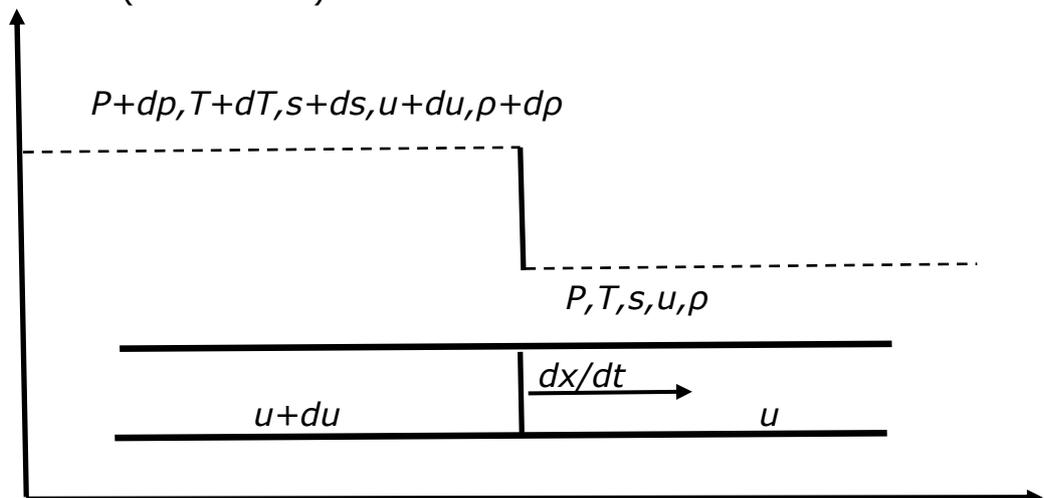
$$\frac{dx}{dt} = u \pm a$$

$$du = \pm \frac{2}{\kappa - 1} * da$$

Hieraus wird ersichtlich, dass sich Störungen in einem Gas mit der Summe aus der Schallgeschwindigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit des ungestörten Mediums verbreiten. Weiter gilt eine lineare Beziehung zwischen der Strömungs- und Schallgeschwindigkeit.

$$u = \pm \frac{2}{\kappa - 1} * a$$

Strömungszustand (Druckwelle)



Ausdehnung der Rotorzelle X

## Symbole und Indizes

$u$	Geschwindigkeit der Strömung
$p$	Druck
$T$	Temperatur
$P$	Dichte
$a$	Schallgeschwindigkeit
$s$	Entropie
$\kappa$	Verhältnis der spezifischen Wärmen
$x$	Ort
$t$	Zeit
$0$	Bezugszustand (Ambient)

Diese grundlegenden Zusammenhänge laufen nun sehr schnell in einem Rotor mit einzelnen Zellen ab und lassen sich auf eine einfachere Darstellung reduzieren, siehe **[3]** und Abbildungen 2.2.1 (Rotor) und 2.2.2 (Schema) oder 2.2.3 eine Animation welche beim Autor erhältlich ist.



Abbildung 2.2.1: Zellrotor eines DWL (Antrova AG)

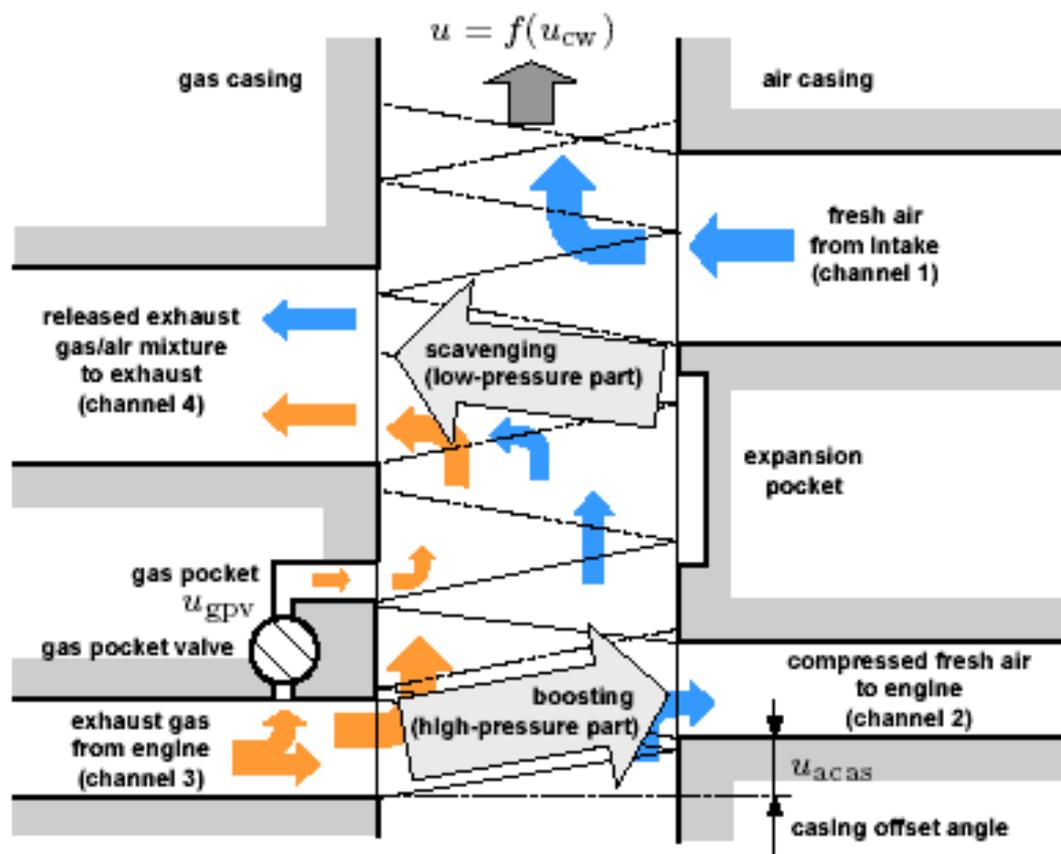


Abbildung 2.2.2: Vereinfachte Darstellung der Funktionsweise eines DWL (Ein Zyklus)

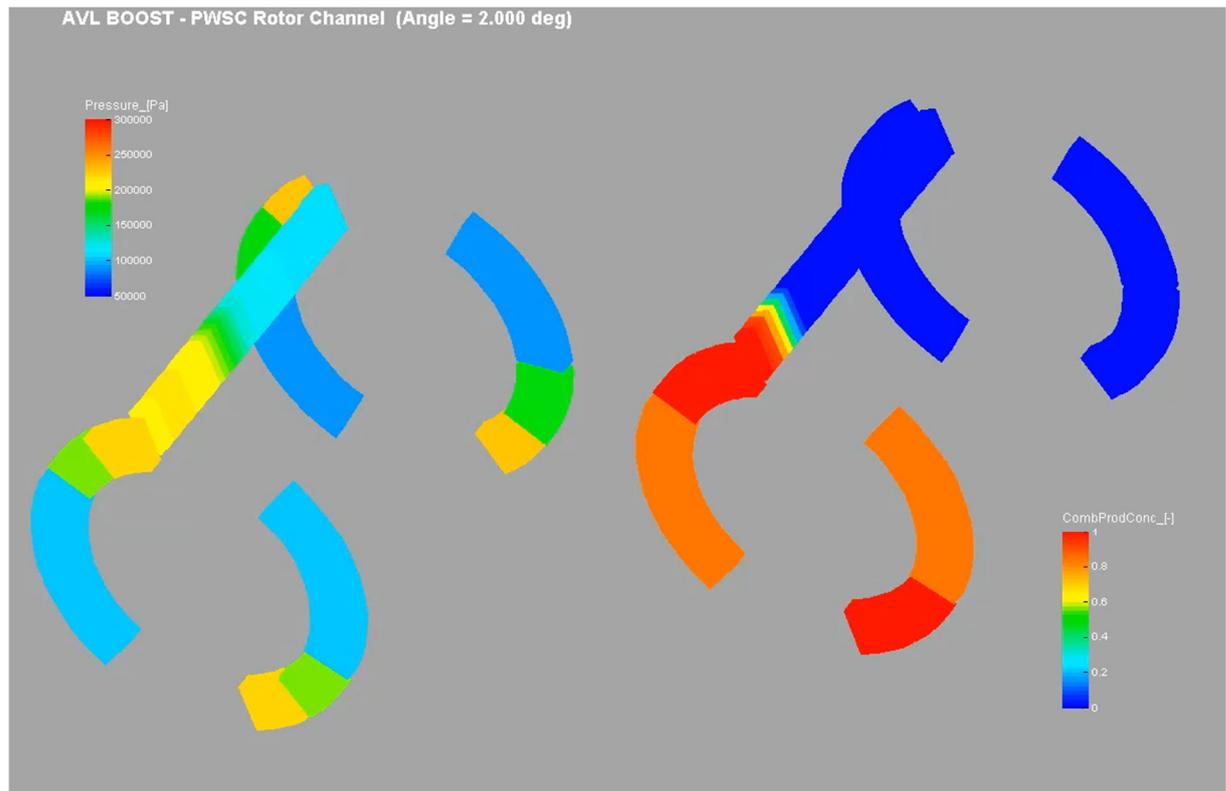


Abbildung 2.2.3: Animation der Funktionsweise eines DWL aus AVL BOOST (Eine Zelle)

In Druckwellenmaschinen wie Druckwellenladern, Drucktauschern oder Wellenrotoren wird die Druckenergie vom einen ins andere Medium übertragen, indem die beiden Fluide in langen, dünnen Kanälen, den so genannten Rotorzellen, für sehr kurze Zeit in direkten Kontakt gebracht werden. Druckwellenmaschinen nutzen das physikalische Prinzip, dass nachdem zwei Medien mit unterschiedlichem Druck in Kontakt gebracht werden der Druckausgleich schneller stattfindet als die Vermischung.

Der Druckwellenprozess lässt sich grundsätzlich in zwei Phasen unterscheiden: den Hochdruck – und den Niederdruckprozess (Abb 2.2.2). Im Hochdruckprozess wird die Abgasenthalpie im Kanal 3 zur Verdichtung des in den Kanal 2 strömenden Frischgases verwendet. Dabei kann ein Teil der Abgasenthalpie durch das Gastaschenventil geführt werden, was einerseits den Druck im Kanal 3 und somit die Kompression des Gases im Kanal 2 reduziert. Andererseits wird somit der Druck in den Rotorzellen kurz vor dem Start des Niederdruckzyklus erhöht, was die Spülung im Niederdruckprozess verbessert. Ziel des Niederdruckprozesses ist, die mit Abgas gefüllten Rotorzellen in Richtung Kanal 4 zu spülen und mit Frischluft aus Kanal 1 zu füllen. Daher ist Kanal 4 im normalen Betrieb nicht nur mit Abgasen gefüllt, sondern immer auch mit Frischluft, die im Hochdruckprozess

verdichtet wurde aber nicht in den Kanal 2 strömte. Daher sind auch die Temperaturen des Abgases tiefer als beim Turbomotor da eine Mischung von heissen mit kalten Gasen stattfindet.

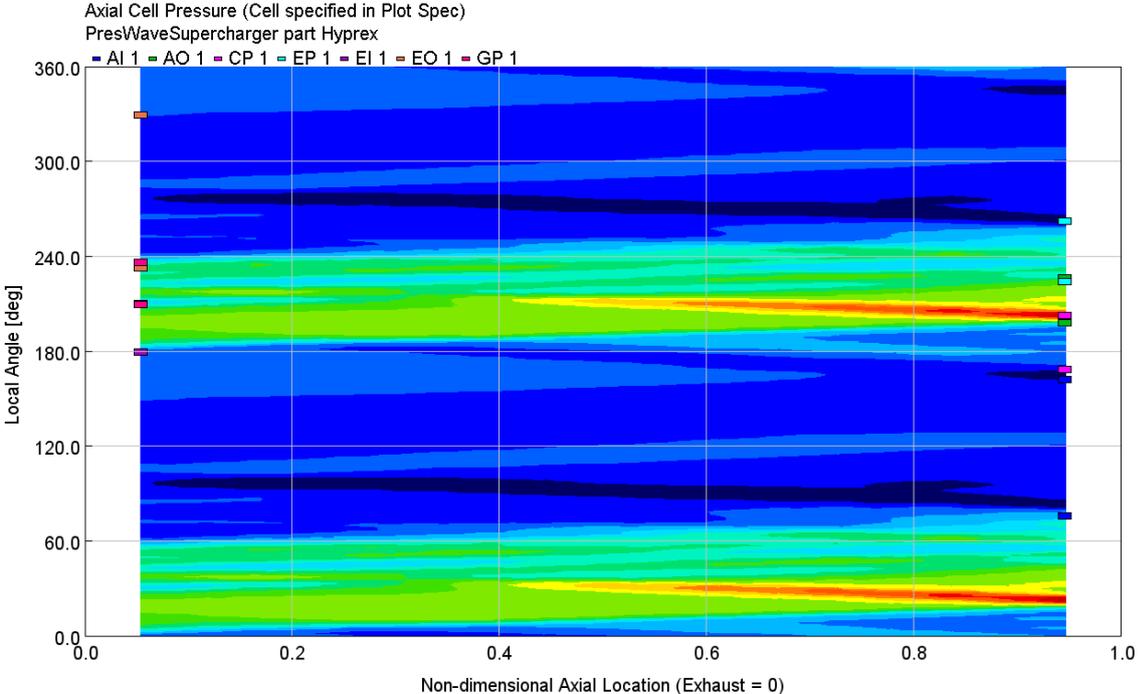


Abbildung 2.2.3: Entnommen aus GT Power Simulation, Abwicklung zweier DWL Zyklen (höchster Druck in rot)

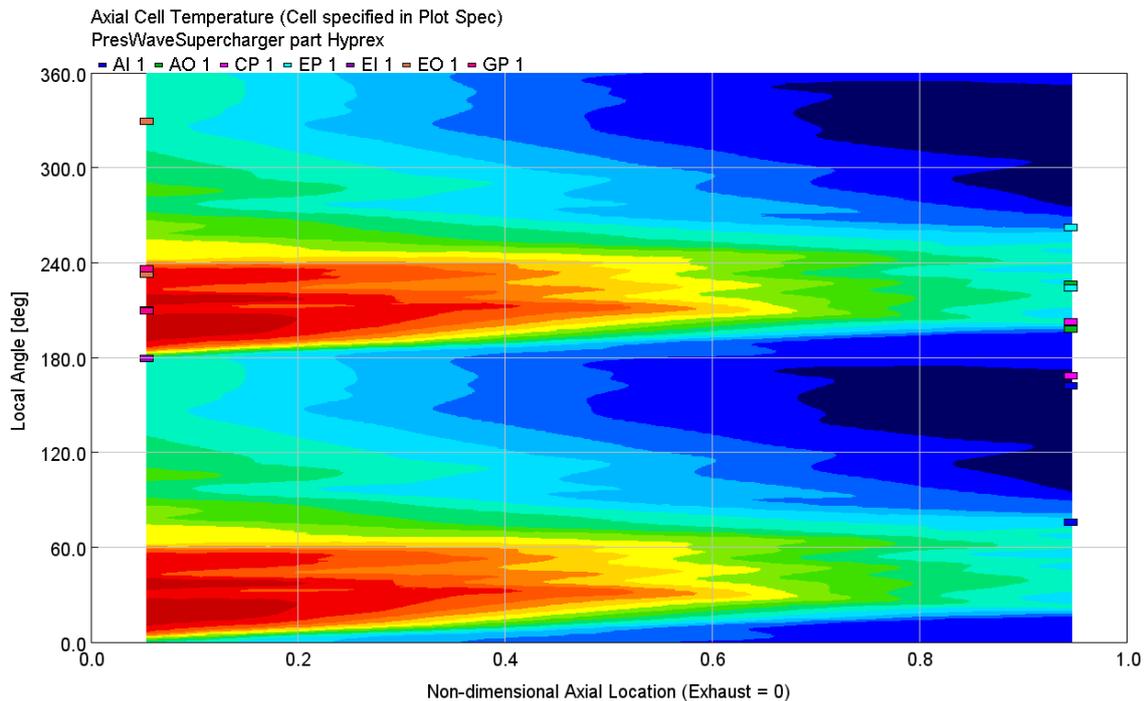


Abbildung 2.2.4: Entnommen aus GT Power Simulation, Abwicklung zweier DWL Zyklen (höchste Temperatur in rot)

Die in der Skizze angeschlossenen Kanäle münden alle beim Rotor wobei die Breite der Kanäle nicht beliebig ist. Von einer Rotorzelle aus gesehen müssen bestimmte Schliess und Öffnungswinkel eingehalten werden damit das Timing für die Gasdynamik stimmt sonst funktioniert der DWL nicht. Man spricht in dem Zusammenhang auch von den Steuerkanten. Auch unterliegen die Kanäle bestimmten An- und Abströmwinkeln und sind nicht so gerade auf den Rotor gerichtet wie im Bild 2.2.2 gezeigt. Auch hier bedarf es bestimmter zu und Abströmwinkel damit keine allzu grossen Inzidenzen beim Übergang vom Rotor zu den Gehäusen entsteht.

## 2.3 Berechnete Performance eines DWL

Für alle Motoren lassen sich mit Hilfe von modernen Simulationsprogrammen wie GT SUITE oder AVL BOOST Druckwellenlader in ein Motorenkonzept einbinden. Die Ergebnisse sind recht vielversprechend und machen eine weitere Erforschung interessant. Im Folgenden wird ein 1.2 Liter Benzinmotor gezeigt ohne Millerprozess. Die Eckdaten sind für eine einstufige Aufladung beeindruckend und es gilt diese auch in der Praxis zu erreichen.

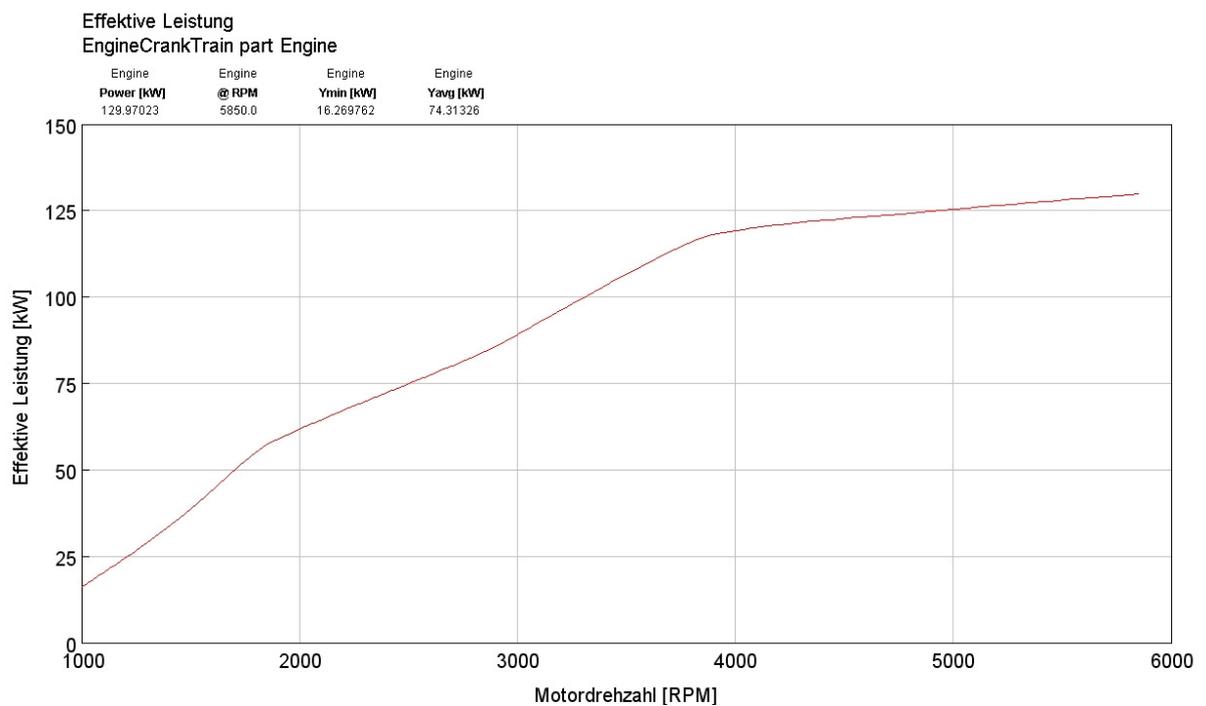


Abbildung 2.3.1: Berechnete Leistung eines 1.2 Liter Benzinmotors (GT SUITE)

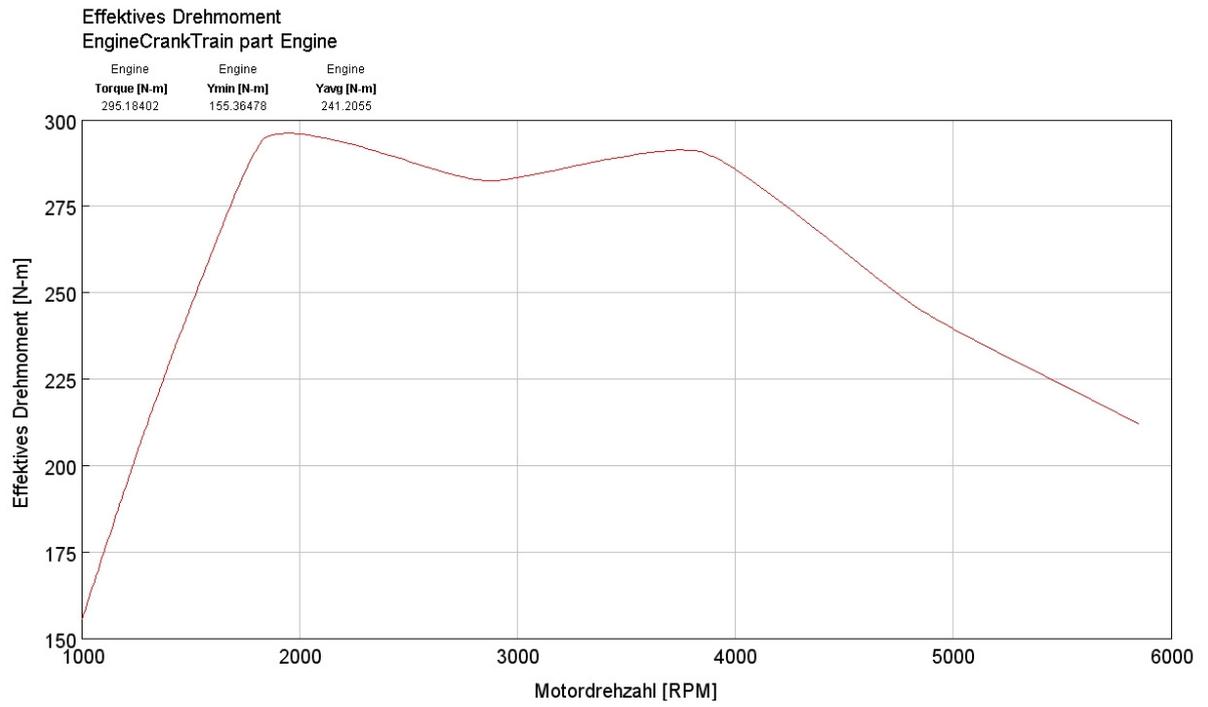


Abbildung 2.3.2: Berechnetes Drehmoment eines 1.2 Liter Benzinmotors (GT SUITE)

### 3 Vergleich des neuen mit dem alten DWL Konzept

Das **alte Konzept** sah vor, dass der Rotor **fliegend** im Luftgehäuse gelagert ist, da im bis zu 1000°C heißen Gasgehäuse kein Lager untergebracht werden konnte.

Speziell bei Benzin und Gasmotoren mit hohen Abgastemperaturen heisst dies aber auch dass der Rotor im kalten Zustand relativ viel Spiel zum Abgasgehäuse braucht um nach seiner Erwärmung und der damit einhergehenden Längung nicht anzustreifen. Dies ist in der Kaltstartphase von grossem Nachteil da die Auspuffgase kaum Arbeit verrichten und am Rotor vorbei geradewegs Richtung Auspuffanlage abströmen.

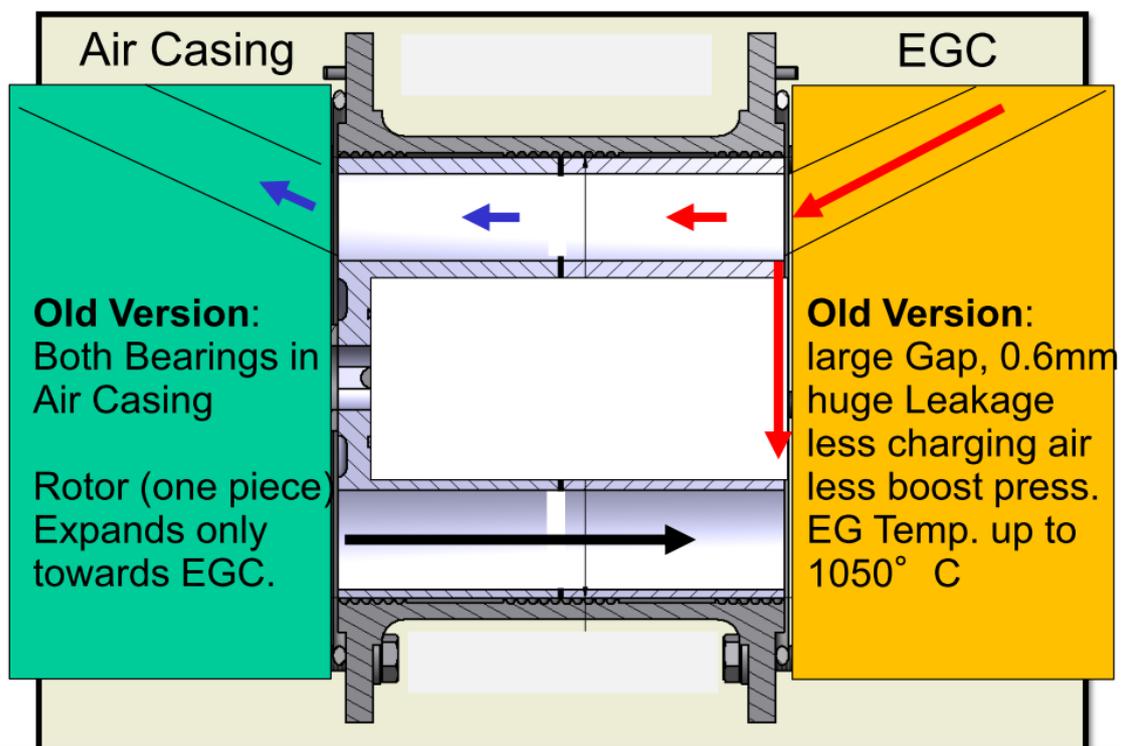


Abbildung 3.1: Schema des alten Compres / Hypres

Das **neue Konzept** sieht hingegen ein doppelwandiges Abgasgehäuse mit **Wasserkühlung** vor in welchem ein Lager untergebracht werden kann.

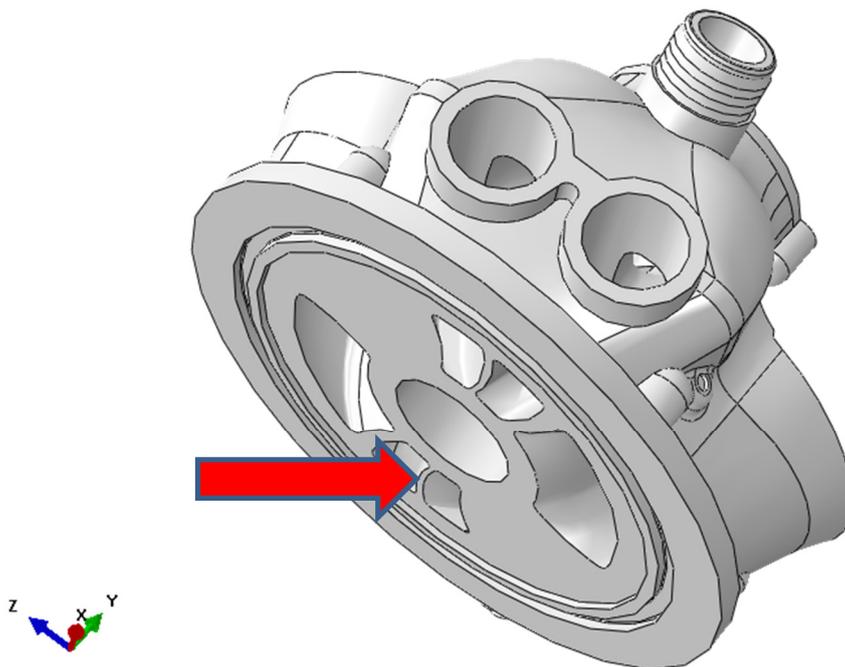


Abbildung 3.1: Seitenansicht des wassergekühlten Heissgasgehäuses aus Aluminium (neues Konzept)

Man beachte die filigrane Wand (siehe Pfeil) welche den Abgasstrom von dem der Gastasche trennt. Hier ist es Antrova AG gelungen ein Konzept zu finden welches auch an dieser kritischen Stelle eine Kühlung des Gehäuses ermöglicht obwohl die heissen Gase hier mit bis zu 1000°C und sehr hoher Geschwindigkeit vorbei strömen.

Die neue **angestellte Lagerung** ermöglicht es die Spiele zwischen Rotor und den Gehäusen (Luft und Abgas) immer gleich und möglichst klein zu lassen unabhängig von der Rotortemperatur.

Natürlich muss auch dieser Rotor die Möglichkeit haben gemäss seiner Temperatur zu wachsen. Hierzu ist der **Rotor in der Mitte geteilt** und besitzt einen kleinen Spalt, welcher sich im Betrieb praktisch schliesst, siehe Bild 3.2.

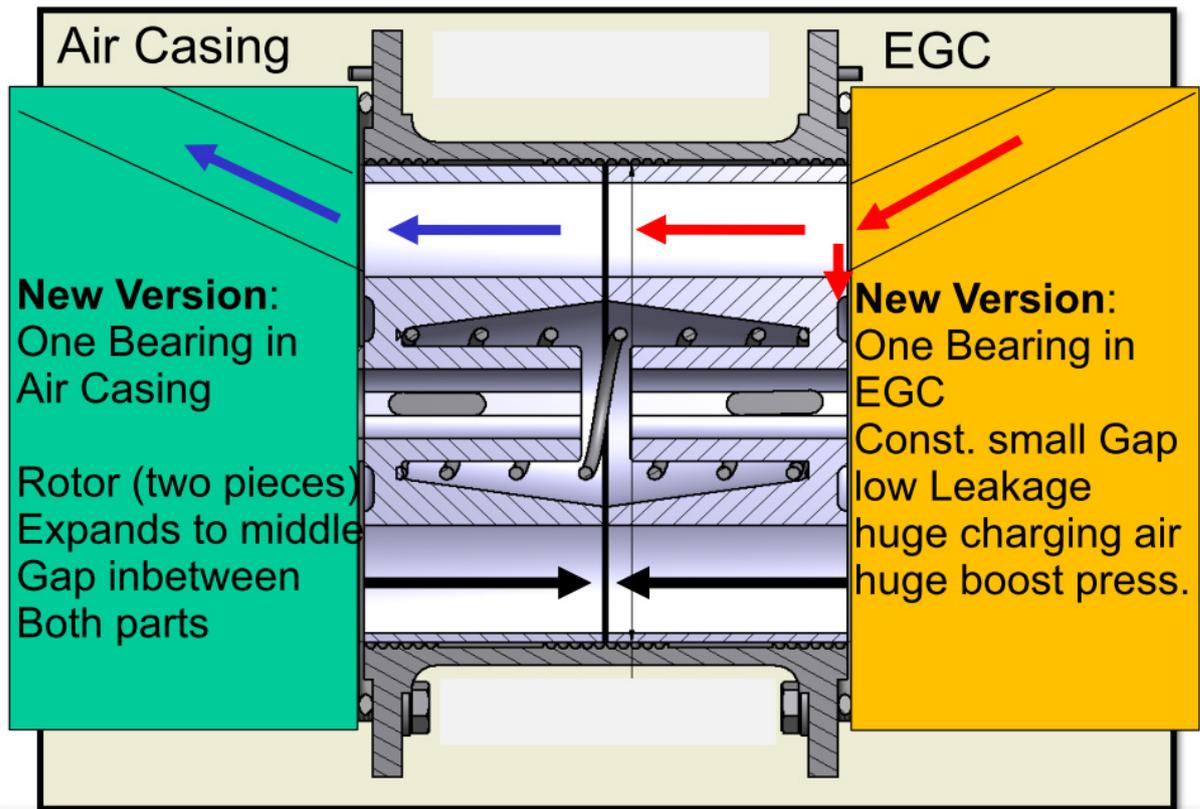


Abbildung 3.2: Schnitt durch den geteilten Rotor im Mantelgehäuse (neues Konzept)

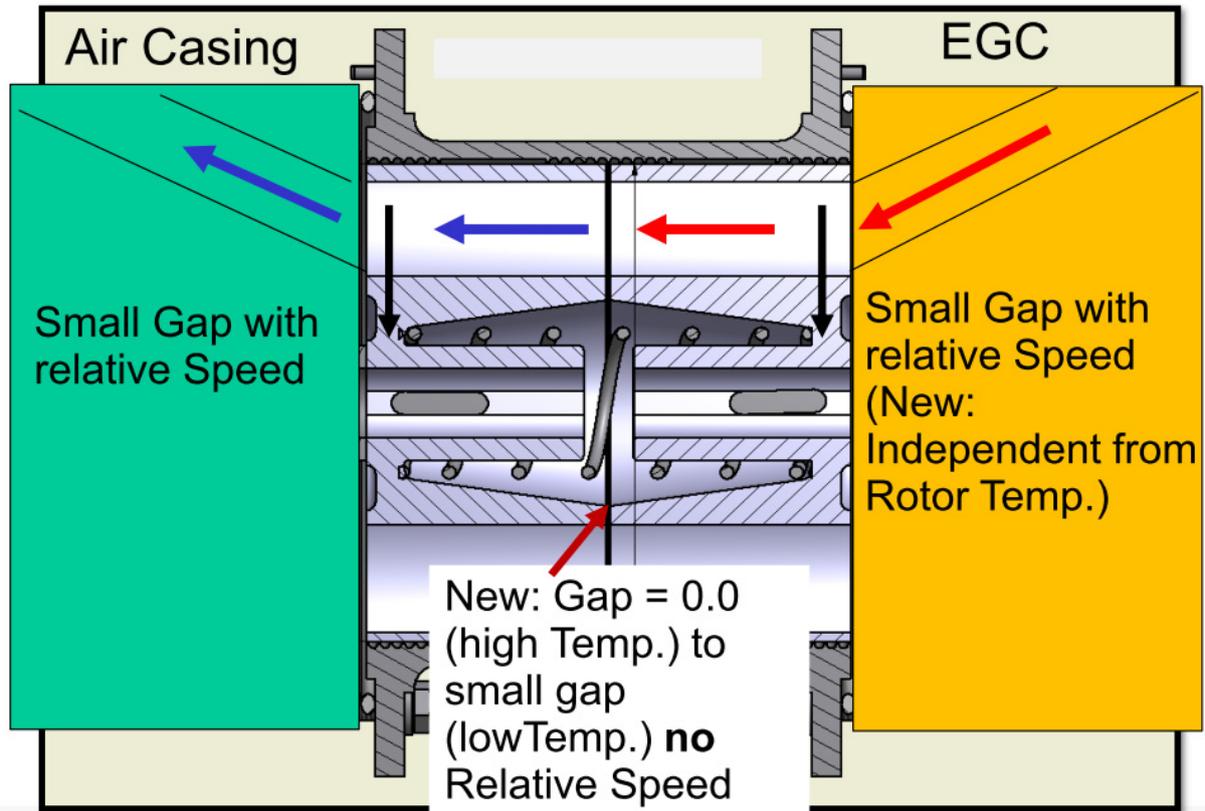


Abbildung 3.3: Spielverhältnisse beim geteilten Rotor im Mantelgehäuse (neues Konzept)

Die Spalte zwischen Rotor und Gehäuse bergen grosse Druckgefälle, welche abgedichtet werden müssen, daher ist hier ein kleines Spiel nötig um eine gute Funktion des DWL zu erhalten **[8]**. Der Wirkungsgrad nimmt rapide ab je grösser diese Spalte bzw. Spiele sind. Beim Spalt in der Mitte ist das etwas anders. Betrachtet man die Zustände von Zelle zu Zelle im Mittenspalt so sind die Zustände darin sehr ähnlich und nur leicht zeitversetzt. Die Druckgefälle sind nicht so gross quer zur Strömungsrichtung und es gibt auch keine Möglichkeit, dass Abgas oder Luft direkt in den jeweiligen Niederdruckprozess ob Luft oder Gasseitig strömen kann wie dies zwischen Rotor und Gehäuse möglich ist. Die Mengen, welche aus einer Zelle herausströmen, strömen dafür in die nächste Zelle hinein sind also nicht verloren. Es besteht nur ein kleiner Austausch (shift) von Zelle zu Zelle. In der Gesamtbilanz ist der Rotorbereich somit ziemlich dicht obwohl er nicht aus einem Stück ist.

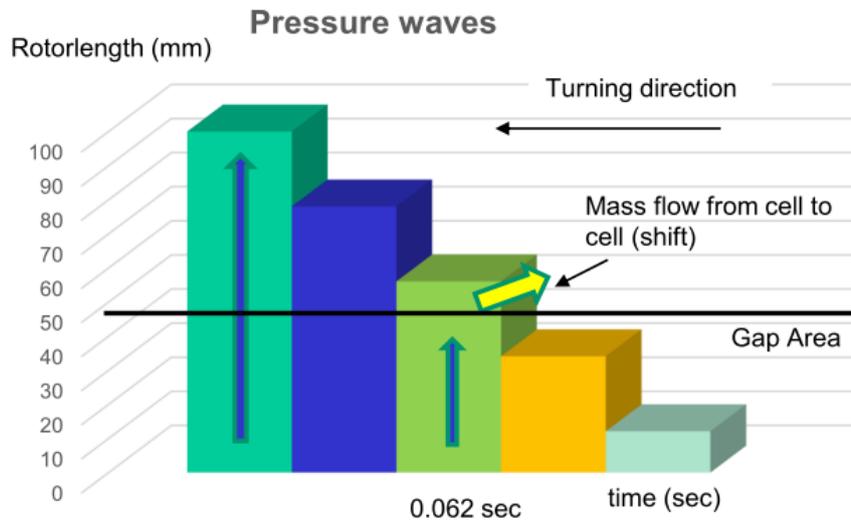


Abbildung 3.4: Einfache Schematische Darstellung der Verhältnisse im Rotorspalt (neues Konzept)

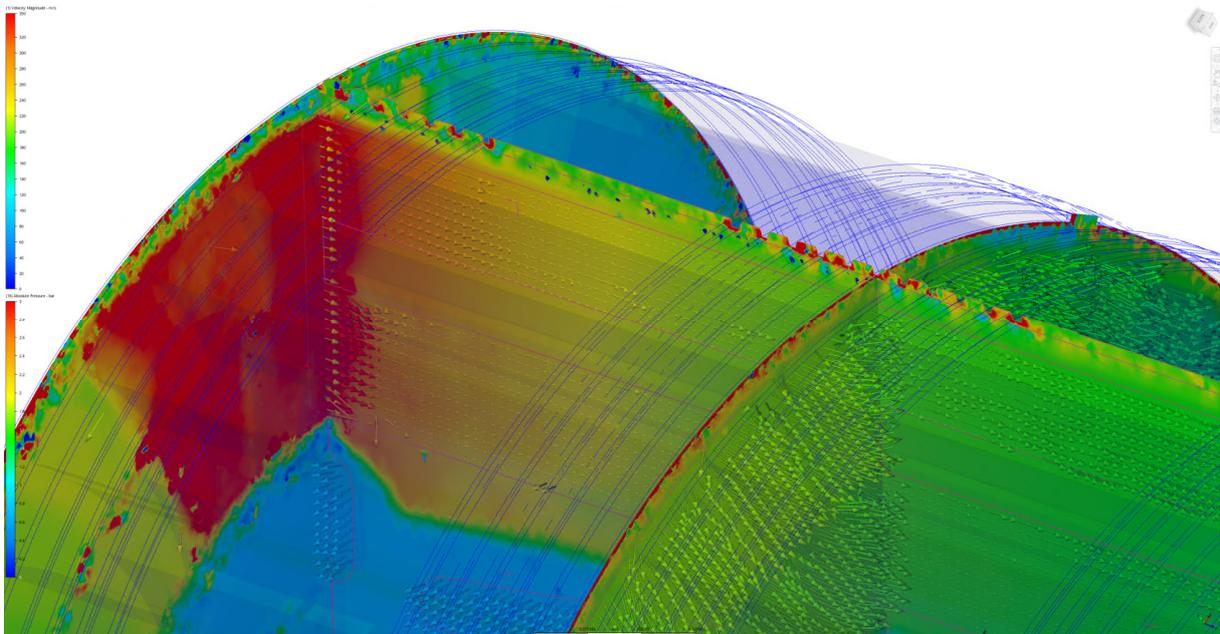


Abbildung 3.5: Aufwendige 3D Simulation von Antrova AG der Verhältnisse im Rotorspalt (neues Konzept)

Sobald der Rotor heiss wird schliesst sich dann der Spalt ohnehin fast völlig und dies geht auch schneller als beim alten Konzept da nur ein halber Rotor aufgeheizt werden muss und beide Rotorhälften auch nie wirklich in Kontakt kommen dürfen. Neben den Simulationen, siehe Bild 3.5, gibt es auch Messdaten bei welchen der Einfluss des Spaltes untersucht und eine Variation vom grösseren Kaltspiel auf praktisch 0.0 mm vorgenommen wurde, siehe Kap. 4.1.1..

Um nochmal auf die Lagerung zurück zu kommen. Beim **alten** Konzept wurde eine Spindellagerung verwendet welche nicht gekapselt werden konnte. Dies führte auch dazu das es vorkam, dass heisses Abgas in diesem Bereich der Lagerung das Fett aus den Lagern geblasen hat, welche dann in der Folge versagt haben. Beim **neuen** Konzept ist dies unmöglich zum einen, weil dort kein heisses Abgas strömen kann und auch die Lager selbst voll gekapselt sind.

Ein weiterer wichtiger Vorteil beim **neuen** Konzept ist, dass der Lader beim **Kaltstart** jetzt bessere Voraussetzungen hat, da man nicht warten muss bis sich der grosse vorgehaltene Spalt auf der Abgasseite schliesst damit sich ein Ladedruck aufbaut. Beim **alten** Konzept war dies der Fall und bedingte eine gewisse Wartezeit.

Beim **neuen** Konzept wurde eine **Zyklusabschaltung** realisiert. Das bedeutet es kann einer der beiden gasdynamischen Zyklen abgeschaltet werden ähnlich wie bei einer Registeraufladung. Beim **alten** Konzept waren immer beide Zyklen beaufschlagt was bei kleinen Durchsätzen einen ungünstigen Einfluss auf die Gasdynamik hatte und in der Folge eine Verdrehung der Luftseitigen Steuerkanten bedingte.

Dies wurde entweder durch das Verdrehen des gesamten Luftgehäuses realisiert oder durch eine Runde Platte mit den Steuerkanten innerhalb des Luftgehäuses da der DWL von aussen eine Einheit bilden muss und ein Verdrehen von Gehäuseteilen in der Praxis nicht in Frage kommt. Dass man sich bei dieser Lösung weitere Verluste wie Sekundärströmungen hinter der Platte oder ungünstige Strömungsverhältnisse zwischen der drehbaren Platte und dem Luftgehäuse einhandelt ist unvermeidbar. Bei der Zyklusabschaltung gibt es diese Verluste nicht und der eine Zyklus läuft in etwa so als wäre der Lader mit zwei offenen Zyklen und dem doppelten Durchsatz unterwegs. Aus diesem Grund wurde beim neuen Konzept auf diese aufwendige Verdrehung der Steuerkanten verzichtet.

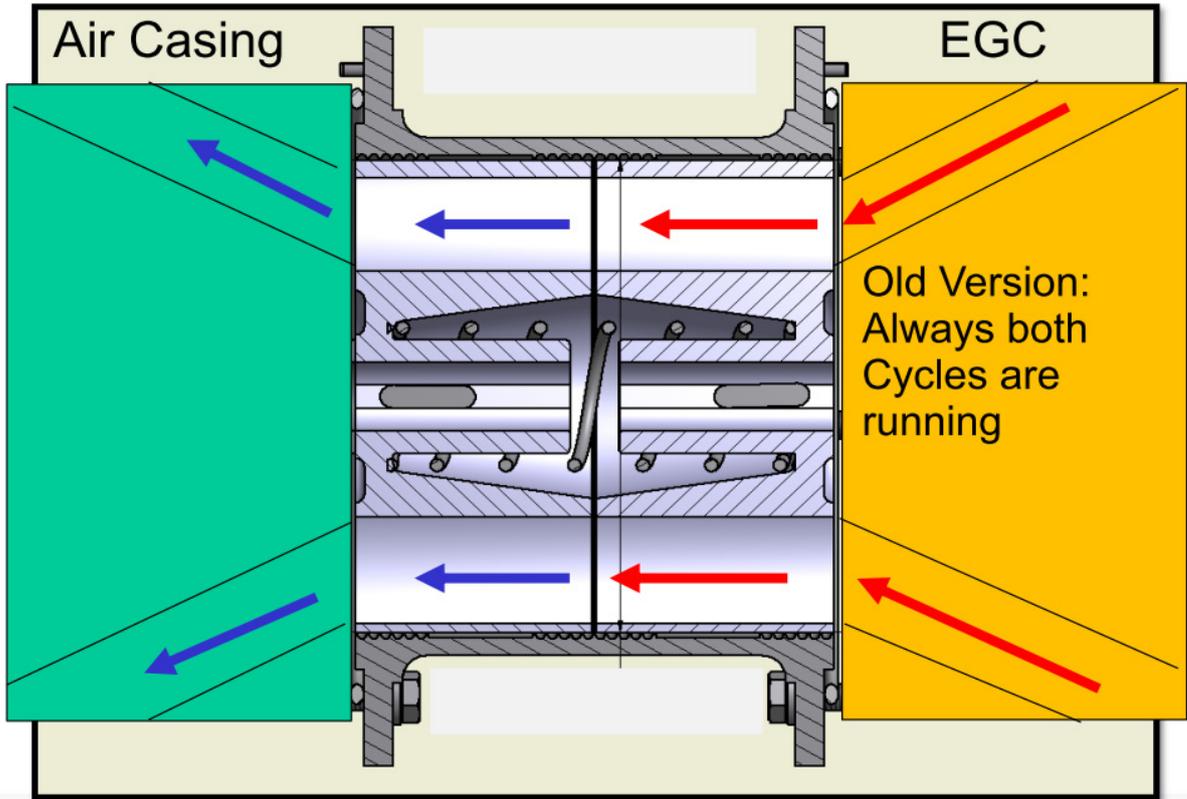


Abbildung 3.6: Schema ohne Zyklusabschaltung (altes Konzept)

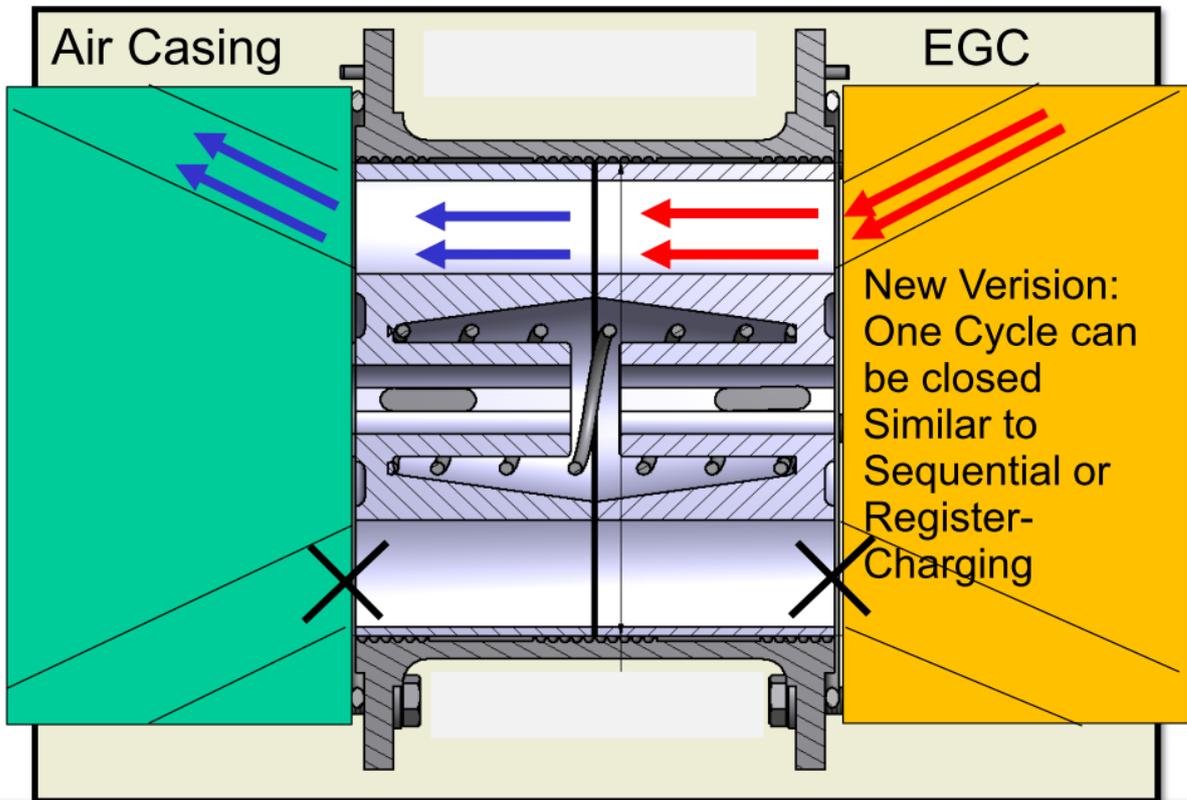


Abbildung 3.7: Schema mit Zyklusabschaltung (neues Konzept)

Es genügt einen passenden Verdrehwinkel fest einzustellen. Dieser kann mit einer Simulation vorab bestimmt werden, aber auch auf dem Motor noch nachjustiert werden. Wichtig bei der Abschaltung eines Zyklus ist noch der Punkt, dass die Rotordrehzahl auf dem Niveau gehalten werden muss welches auch bei doppeltem Durchsatz mit zwei offenen Zyklen herrscht. Dies bedeutet in der Praxis, dass der Lader im Grunde auf etwa gleichem Drehzahlniveau betrieben werden kann, ein rasches Beschleunigen des Rotors um einem schnell hochdrehenden Verbrennungsmotor zu folgen ist nicht erforderlich. Daher kann der Antriebmotor des Laders auch mit einer kleineren Leistung als beim alten Konzept auskommen.

Lediglich die Umschaltung von einem auf zwei Zyklen wird in diesem Fall benötigt und dies kann im Vergleich zum beschleunigen des Rotors wesentlich schneller erfolgen.

Beim neuen Konzept ist somit ein Fall das man bei einem «dip in» also voller Beschleunigung des Fahrzeugs den Lader nicht schnell genug hochdrehen kann und zuviel Restgas in den Verbrennungsmotor kommt nicht mehr möglich.

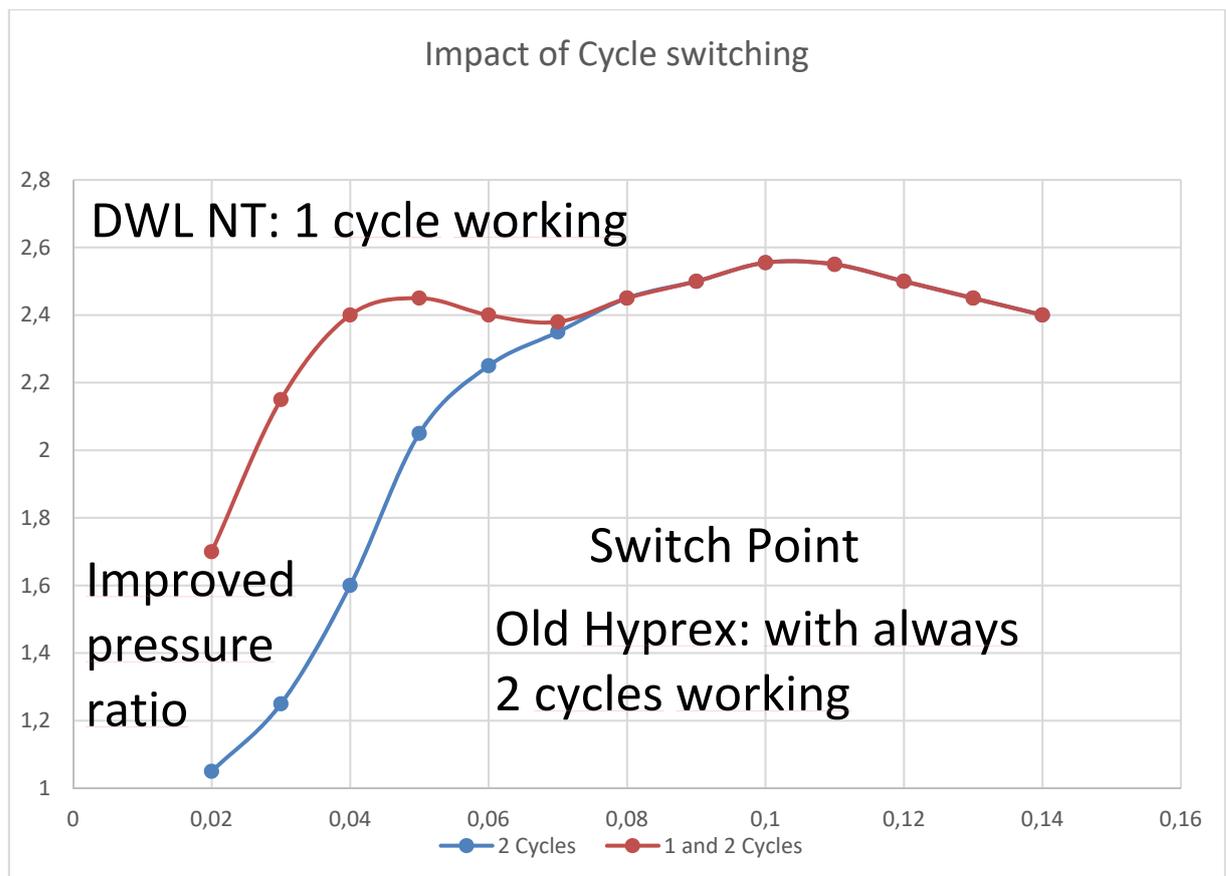


Abbildung 3.7: Schema vom Druckaufbau bei Zyklusabschaltung (neues Konzept)

Des Weiteren hat die Wasserkühlung des Abgasgehäuses den Vorteil, dass sich das Gehäuse nicht mehr verzieht was beim alten Konzept zu Undichtigkeiten und Klemmen der langen Steuerwelle für die variablen Gastaschen geführt hat. Die neuen Steuerwellen sind wesentlich kürzer und das Gehäuse verzieht sich nicht mehr. Es können sogar O-Ringe zur Abdichtung verbaut werden, was vorher undenkbar war.

Aufgrund der gut reproduzierbaren Spiele ist die Performance jedes in Serie gebauten DWL mit dem neuen Konzept auch praktisch gleich, was sehr wichtig für die Applikation auf dem jeweiligen Motor ist.

All diese Punkte tragen dazu bei den DWL konzeptionell viel näher an eine Serienfertigung zu bringen als bisher.

Tabelle 3.1: Alle neuen Bestandteile des Konzeptes im Überblick

	<b>Concept</b>	<b>old</b>	<b>new</b>	<b>Rating new concept</b>
1	<b>Water cooling</b>	<b>no</b>	<b>yes</b>	<b>+++</b>
2	<b>Cycle shift</b>	<b>no</b>	<b>yes</b>	<b>++</b>
3	<b>Split rotor</b>	<b>no</b>	<b>yes</b>	<b>++</b>
4	<b>Capsuled bearings</b>	<b>no</b>	<b>yes</b>	<b>++</b>
5	<b>Aluminum hot gas casing without nickel</b>	<b>no</b>	<b>yes</b>	<b>+</b>
6	<b>Edge shift</b>	<b>yes</b>	<b>no</b>	<b>++</b>
7	<b>Casing geometry influenced by temperatures</b>	<b>yes</b>	<b>no</b>	<b>+++</b>
8	<b>Electric driver</b>	<b>yes</b>	<b>yes</b>	<b>++</b>
9	<b>Small speed variation</b>	<b>no</b>	<b>yes</b>	<b>++</b>

## 4 Prototyp Messungen

Bis hierher wurde nur die Theorie des neuen DWL aufgezeigt, aber es gibt auch schon Prototypen welche seit geraumer Zeit Tests unterzogen werden. In [2] wird der DWL und seine prinzipielle Funktion sehr schön beschrieben und es werden sowohl Messungen am Heissgasprüfstand, Messungen vom Motorenprüfstand als auch Simulationen vorgestellt. Die Vorteile des DWL werden aufgezeigt, allerdings auch diverse Nachteile aufgedeckt welche aber zum allergrößten Teil der alten Konstruktion geschuldet sind. Daher wurden Lehren aus den vorhandenen Erfahrungen gezogen und wie eben beschrieben eine neue Konstruktion von Antrova AG lanciert. Die in [2] durchgeführten Messungen am Heissgasprüfstand bedingen allerdings das Wissen darum, dass der Hochdruckpfad nicht geschlossen war. Daher ist dort  $m_3$ , also der Mengenstrom am Heissgaseintritt als Referenzwert für den Durchsatz angegeben worden.

### 4.1 Heissgasprüfstand

Bei relevanten Messungen am Heissgasprüfstand ist ein Punkt sehr wichtig und muss beachtet werden. Im Gegensatz zu einer Turboladermessung muss für aussagefähige Messungen der DWL selbst die Gasmenge am Heissgaseintritt liefern indem es einen geschlossenen Hochdruckpfad zwischen Ladeluftaustritt ( $m_2$ ) und eben dem Heissgaseintritt gibt. Es gilt in jedem Fall  $m_3 = m_2 + m_{\text{Brennstoff}}$ .

Da die handelsüblichen Heissgasprüfstände vom Marktführer nicht dafür vorgesehen sind eine solche Messung zu fahren muss man sich mit einem Trick helfen indem man mit Hilfe eines Heissgaswärmetauschers (HWT) den gewünschten Pfad entkoppelt von den technischen Gegebenheiten der Brennkammer betrachten kann. Die maximalen Gaseintrittstemperaturen am DWL sind mit dem HWT zwar auf ca. 660°C beschränkt aber das stört nicht sonderlich in diesem Zusammenhang. Für die Zirkulation im Hochdruckpfad sorgt dann ein Rootsgebläse wie schon seinerzeit gehandhabt wurde als noch bei BBC Baden (CH) Complex Lader vermessen wurden.

Ohne diese Maßnahme ist  $m_2$  durch die nötige Androsselung wesentlich kleiner als  $m_3$  und die Messungen mögen für relative Vergleiche oder mechanische Tests erhalten, sind aber nicht wirklich repräsentativ, wenn es um die echten thermodynamischen Daten oder die Drehmomente am Rotor geht. Des Weiteren sind vor jedem Testlauf die genauen Spiele des Rotors zu messen und zu dokumentieren.

#### 4.1.1 Aktivitäten Heissgasprüfstand

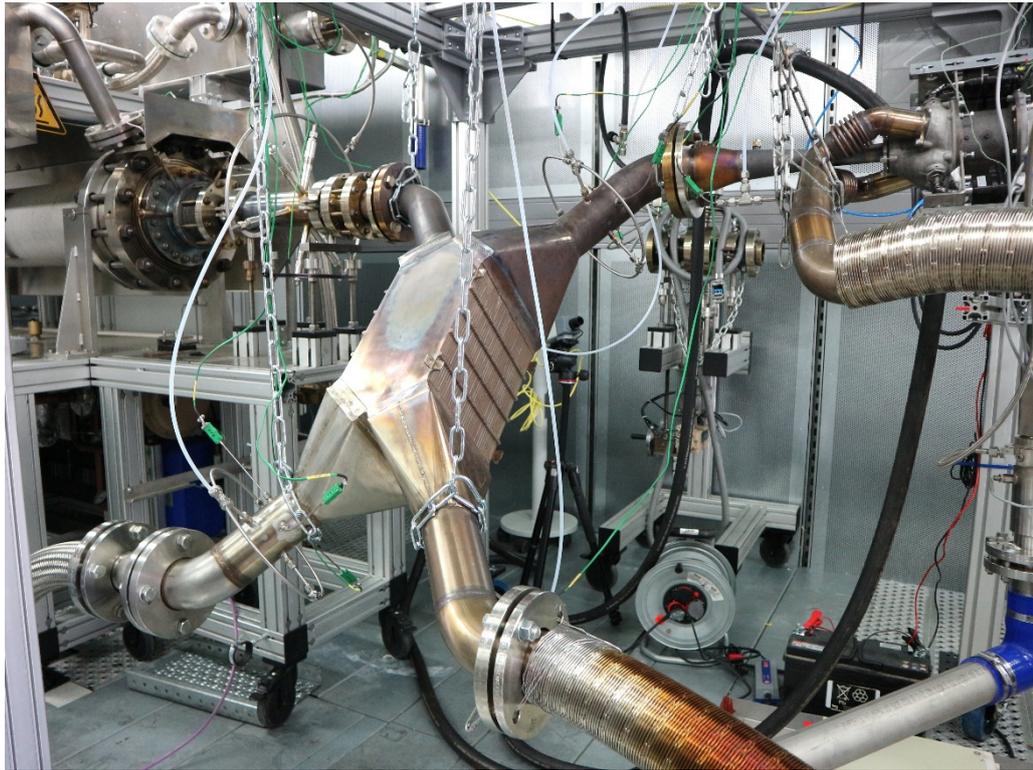


Abbildung 4.1.2: Kernstück der Heissgasmessung ist ein hochtemperaturfester Heissgaswärmetauscher (HWT) (Foto: Messung auf Turboladerprüfstand ICT Karlsruhe 2018).

Diese Messungen konnten zeigen, dass der DWL mit dem neuen Konzept auf einem viel versprechenden Weg ist. Es ist auch darauf zu achten, dass bezüglich der Druckverluste speziell im Niederdruckbereich des DWL keine Turbolader Standards zum Tragen kommen. Wie erwartet sind hohe Wirkungsgrade möglich.

Neben der reinen Performance des DWL drängte sich die Frage auf welchen Einfluss der Mittenspalt zwischen den beiden Rotorhälften hat. Daher wurde der Unterschied im Ladedruck mit einem grösseren und kleinen Mittenspalt des Rotors gemessen. Dieser Einfluss wurde bei einem relativ kleinen Massendurchsatz von  $0.035\text{kg/s}$  untersucht und auch mit keiner besonders hohen Temperatur am Heissgaseintritt von  $400^\circ\text{C}$ . Der daraus resultieren Volumenstrom sollte so hoch sein, dass etwas Ladedruck erzeugt wird (ca.  $1.6\text{ bar abs}$ ) aber auch nicht so groß, dass der Einfluss kaum messbar ist. Um den Einfluss des Spaltes abzuschätzen wurde ein Vergleich zwischen dem Druck auf der Heissgasseite  $p_3$  stat und dem Ladedruck  $p_2$  stat vorgenommen. Bei einer Verkleinerung des Spaltes um  $0.3\text{mm}$  verringerte sich die Differenz zwischen diesen beiden Werten lediglich um  $9.7\text{mbar}$  zu Gunsten des kleinen Spaltes was die Theorie bestä-

tigt, dass die Performance des Laders auf den Mittenspalt nicht so empfindlich reagiert wie auf die Spalte am Rande des Rotors.

## 4.2 Motorenprüfstand

Hier ist voraus zu schicken, dass die gemessenen statischen Werte im Motorkennfeld nicht alle unbedingt um Welten besser sind als bei Turboladernmotoren, siehe auch [2], aber man kann aufgrund der Möglichkeiten des DWL den Motor weitgehend in Bereichen betreiben, welche ein niedertouriges Fahren erlauben ohne dass es an Zugkraft mangelt.

Das Fahrgefühl ähnelt, dem eines Elektroautos da sofort genügend Drehmoment zur Verfügung steht. Daher muss man den Motor nicht auf Drehzahl bringen wenn man Beschleunigen will und kann dies auch sehr gut Dosieren da man nicht, wie bei Turbomotoren oft gesehen, aus Ungeduld mehr Gas gibt als notwendig.

Bei einzelnen Szenarien und Motoren liegen bis zu 20% Ersparnis an Kraftstoff im Bereich des Möglichen. Wie in der Überschrift angekündigt geht es auch um bessere Emissionswerte was ebenfalls bereits untersucht wurde. Unmittelbar klar ist dem Leser die Tatsache, dass ein Katalysator welcher vor dem Aufladegerät sitzt schneller aufzuheizen ist und der Zeitanteil bei welchem im Motorbetrieb die absolut meisten Emissionen entstehen auf ein möglichst kleines Mass reduziert werden kann. Natürlich sind sämtliche Massnahmen welche den Katalysator schneller erhitzen hier auch von Nutzen. Extrem spätes Zünden zum Beispiel oder ein Katalysator der heizbar ist schliessen sich mit dem Betrieb des DWL nicht gegeneinander aus, im Gegenteil.

Betreffend Emissionen muss die Tatsache hervorgehoben werden, dass die zukünftigen Grenzwerte wenn überhaupt wohl nur noch mit Heizkatalysatoren und vor allem Partikelfiltern erreichbar sein werden. So der Tenor bei der diesjährigen Emission Control Konferenz in Dresden. Hierbei könnte die Position der Abgasreinigung vor dem Aufladegerät von Vorteil sein.

Um hier etwas vorzugreifen, haben zuverlässige Messdaten hinsichtlich der Emissionen gezeigt, dass z.B. die HC Werte am Gasmotor stark gesenkt werden konnten. Die CO und NOx werte bleiben praktisch unbeeinflusst. Die Wirkungsweise der Abgasreinigung auf der Hochdruckseite wird daher auch von Antrova AG und seinen Partnern genau untersucht um das Potential voll auszuschöpfen.

## 4.2.1 Aktivitäten Motorenprüfstand

Der interessierte Leser mag Verständnis dafür haben, dass an dieser Stelle keine detaillierten Angaben gemacht werden können um welche Motoren es sich bei den Messungen genau handelt, aber es kann eine Richtung betreffend wichtiger Daten angegeben werden um die Vorteile des Laders aufzuzeigen. Zu einem späteren Zeitpunkt wird es hierzu Veröffentlichungen geben, die zeigen werden, dass hier momentan ein großer Aufwand betrieben wird.

Zu den Aktivitäten am Motorenprüfstand gehört auch eine ständige Verbesserung an der Peripherie des Laders und der dazugehörigen Elektrik. Zudem die Erfahrung, dass auch der Prüfstands Betreiber einen erheblichen Anteil am Gelingen der Versuche hat. So wurde ein kleinerer Benzinmotor von uns getestet und an einem anderen Prüfstand mittlerweile auch ein gasbetriebener Ottomotor erfolgreich in Betrieb genommen der inzwischen große Mengen an Daten geliefert hat und noch liefern wird. Von Gasmotoren mit DWL ist dem Autor bisher niemals etwas überliefert worden, daher ist diese Anwendung möglicherweise so noch nie getestet worden.

Fazit aus den letzten Motorversuchen. Hoher Ladedruck ist machbar kein zweistufiges Aufladen nötig. Eher die Klopfgrenze ist hier eine rote Linie, daher werden noch weitere Untersuchungen durchgeführt, welche auch eine weitere Optimierung des Gasmotors beinhalten um alle Potentiale voll auszuschöpfen. Der Kaltstart gelingt inzwischen problemlos und auch der Lader selbst zeigt sich als mechanisch sehr robust indem es keinerlei Probleme mit den Lagern (wie in [2] beschrieben), Verzug oder Klemmen mehr gibt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit all den genannten Vorteilen hinsichtlich Performance und Haltbarkeit kann der Comprex™ DWL eine echte Alternative sein die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch im Zuge der Gesetzgebung weiter signifikant abzusenken, bei gesteigerter Dynamik (Fahrspaß) wohlgemerkt.

Der nach dem neuen Konzept in dieser Größe für Automotive Anwendungen konstruierte DWL mit gekühltem Heissgasgehäuse, geteiltem Rotor und Zyklusabschaltung, kann speziell bei kleinen Benzin- und Gas-Motoren mit Vorteil eingesetzt werden wo es für den Turbolader immer schwieriger wird genügend hohe Wirkungsgrade zu erzeugen und den Spagat zwischen gutem dynamischen Ansprechverhalten und hoher Nennleistung zu vollbringen. Was aber nicht heißen soll, dass es keine attraktive Anwendung für große Verbrennungsmotoren mit entsprechend zu konstruierenden Druckwellenladern gibt. Betreffend der kostensensiblen Anwendungen im Automotive Bereich muss für einen DWL das gesamte Paket inkl. Auspuffanlage und Abgasreinigung angeschaut werden. Erfreulich dabei ist, dass dem Nutzer insgesamt weniger Kosten aufgebürdet werden als es die im Zuge der Gesetzgebung benötigten Maßnahmen wie e-boost, VTG und oder zweistufige Aufladung bzw. Registeraufladung erfordern, zumal auch die Herstellung der Comprex Rotoren dank neuer Verfahren zum massenweise Printen von Bauteilen zukünftig wesentlich vereinfacht wird.

Von daher erscheint es dem Autor interessant sich gerade jetzt auch weiterhin mit den Thema DWL intensiver auseinander zu setzen zumal, es gut sein kann, dass die zukünftigen Euro 7 und Euro 8 Grenzwerte mit einem Druckwellenlader leichter zu erfüllen sind.

### Danksagungen



Stefan Hess und Jan Böckelmann, ICT Karlsruhe (D)



Henrik Schuemie, AVL Graz (A)



Daniel Schimmel, Gamma Technologies (USA)

## Literatur

- [1] ABB Turbo Systems AG: 100 Jahre Turbolader. In: Turbo Magazin Sonderdruck 2/2005, 2005
- [2] Binder E. Untersuchungen zum Potential eines Verbrennungsmotors mit Druckwellenlader, Bericht aus dem ivb Band 4 Braunschweig 2015.
- [3] Croes N. Die Wirkungsweise der Taschen des Druckwellenladers COMPREX. MTZ Motortechnische Zeitschrift 40 (1979) 2
- [4] Flückiger, L.; Tafel S. : Hochaufladung mit Druckwellenlader für Ottomotoren, MTZ 67 12/2006.
- [5] Golloch, R.: Downsizing bei Verbrennungsmotoren. Berlin/Heidelberg: Springer, 2005.
- [6] Guzzella, L.; Wenger, U.; Martin, R.: IC-Engine Downsizing and Pressure Wave Supercharging for Fuel Economy. SAE 2000-01-1019.
- [7] Hagelstein, D.; Theobald, J.; Michels, K.; Pott, E.: Vergleich verschiedener Aufladeverfahren für direkteinspritzende Ottomotoren. 10. Aufladetechnische Konferenz Dresden 2005.
- [8] Hörler, H.: Abschätzung der Verluste in instationär-gasdynamischen Kanaltrommel-Drucktauschern, ETH zürich, Diss., 1969
- [9] Real, R.: The 3000 kW Gas Turbine Locomotive Unit. In: Brown Boveri Review 33 (1947), Nr. 10, S. 270-271.
- [10] Skopil, M.; Der Druckwellenlader: Mythos oder Möglichkeit die CO<sub>2</sub> Emissionen stark zu reduzieren: 2. Motorenkonferenz Baden Baden 2015.
- [11] Spring, P.: Modelling and Control of Pressure-Wave Supercharged Engines Systems. Zürich, ETH, Dissertation No. 16490, 2006.

- [12] Spring, P.; Onder, C.; Guzzella, L.; submitted for publication. EGR Control of Pressure-Wave Supercharged IC Engines. IFAC Journal of Control Engineering Practice.
- [13] Spring, P.; Onder, C.; Guzzella, L.; submitted for publication. Fuel-optimized Control of a Pressure-Wave Supercharger: A Model-based Feedforward Approach. Special Issue on Automotive Controls by the IEEE Transactions on Control Systems Technology.
- [14] Zehnder, G.; Mayer, A. ; Matthews, L. : Free Running Pressure Wave Charger – A Study for an Advanced Supercharging System. SAE Technical Papers Serie 1989, Nr. 89045