

Ein neues Schraubenverdichterkonzept zur Realisierung sehr hoher Abgasrückführraten beim Dieselmotor

A new twin-screw compressor concept for realizing very high exhaust-gas recirculation rates

Über die Verwendung eines modifizierten Schraubenladers zum Fördern und Mischen von Abgas und Frischluft als Methode zur Verbrennungsgasaufbereitung eines Dieselmotors

Involving the use of a modified supercharger for delivering and mixing exhaust gas and fresh air as an exhaust gas recirculation method in diesel engines

Dipl.-Ing. **K. Rohrßen**, IAV GmbH, Gifhorn;

Dipl.-Ing. **M. Frambourg**, IAV GmbH, Gifhorn;

Kurzfassung

Beim Dieselmotor hat sich die Abgasrückführung als Maßnahme zur Schadstoffreduzierung bewährt. Immer höhere Anforderungen an die Reduzierung der Stickoxidemissionen zwingen zu größeren Anteilen von Abgas in der Verbrennungsluft. Um dies zu ermöglichen, wurde ein Schraubenlader zwischen Abgasturbolader und Motor platziert und mit einer neuentwickelten Drehschiebersteuerung auf der Einlassseite modifiziert, sodass er nicht nur Frischluft und Abgas aktiv verdichten kann, sondern auch beide Komponenten im gewünschten Verhältnis mischt. Der Antrieb des Schraubenladers über ein Riemenscheibenplanetengeräte macht es außerdem möglich, ein optimales Zusammenspiel der drei in Reihe geschalteten Komponenten, nämlich des Abgasturboladers, des Schraubenladers und des Verbrennungsmotors, einzustellen.

Abstract

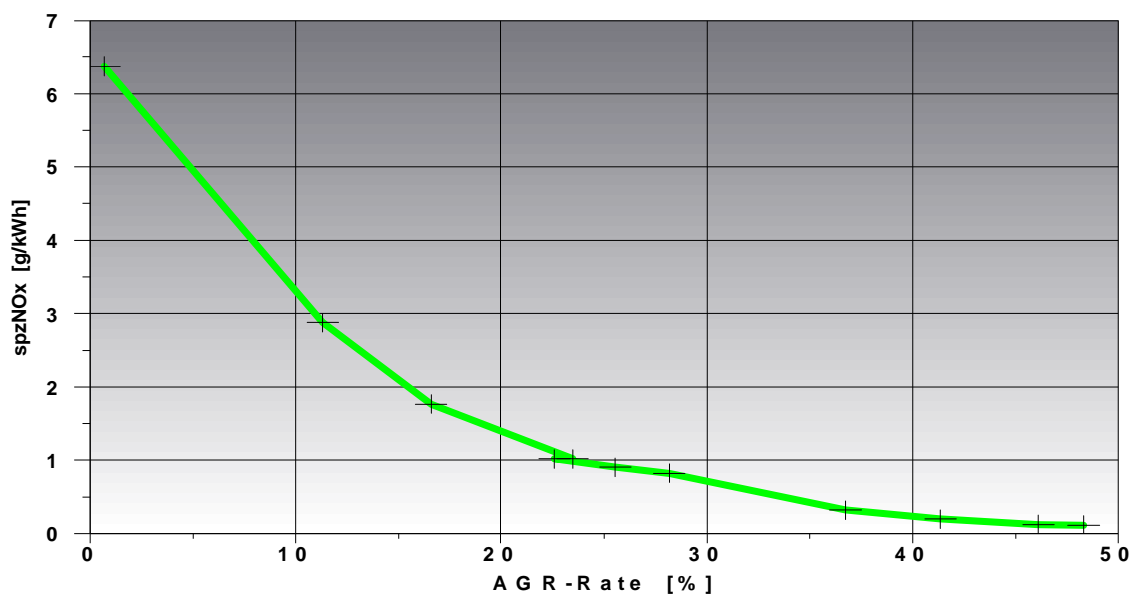
Exhaust gas recirculation has proved itself to be a successful method of emissions reduction in diesel engines. Constantly increasing requirements for reduction of nitrogen oxide emissions are demanding added exhaust gas rates in the combustion air. To make further reductions possible, a screw compressor has been placed between the exhaust-gas turbo charger and the motor. The screw compressor has been modified with a newly developed rotary slide control on the inlet side, so that it not only actively compresses fresh air and exhaust gas but also mixes the two elements to the desired ratio. The drive mechanism of

the screw compressor via a pulley drive planetary gear also makes it possible to adjust an optimal interaction between the three serial connected components: the exhaust-gas turbo charger, the screw compressor and the combustion engine.

1. Emissionsverringerung durch Abgasrückführung

Um die Bedeutung der Abgasrückführung für die Emissionsverminderung beim Dieselmotor zu verstehen und damit die Motivation für das Projekt aufzuzeigen, ist es sinnvoll zum Anfang einige Meßergebnisse vorzustellen. Im Gegensatz zum Ottomotor, der bei möglichst ausgeglichenem Mischungsverhältnis von Kraftstoff zu Sauerstoff betrieben wird, ist der Sauerstoffanteil beim Dieselmotor stets größer als das stöchiometrische Verhältnis. Dieser Sauerstoffüberschuß hat eine Stickoxidbildung zur Folge, die nicht wie beim Ottomotor mit einem Dreiwege-Katalysator wieder in ungiftige Bestandteile reduziert werden kann. Die Stickoxidbildung ist im überwiegenden Maß von der Verbrennungstemperatur, etwas schwächer von der Sauerstoffkonzentration und noch geringer von weiteren Faktoren abhängig. Durch die Rückführung von Abgas wird der nicht an der Verbrennung teilnehmende Anteil des vom Motor angesaugten Gasgemisches erhöht. Da die gleiche Energiemenge nun auf eine größere Gasmenge verteilt wird, sinkt die Spitztemperatur im Brennraum. Durch die geringere Sauerstoffkonzentration sinkt zusätzlich die Reaktionsgeschwindigkeit der Verbrennung. Durch diese langsamere Oxidation sinken die lokalen Temperaturen und die Stickoxidbildung nimmt ab. Bild 1 zeigt deutlich die Abnahme der stündlichen NOx Emissionen mit der Erhöhung der Abgasrückführrate (AGR-Rate) für einen definierten Betriebspunkt bei 1500 1/min Motordrehzahl und 80 Nm Drehmoment.

1 5 0 0 1 / m i n 8 0 N m



Es ist in diesem Beispiel zu erkennen, daß der NO_x Massenstrom gegenüber einem AGR-freien Betrieb um mehr als 90% gesenkt werden konnte. Das Potential der Abgasrückführung zur Emissionsverminderung ist damit deutlich zu erkennen. In dieser Größenordnung ist es allerdings nicht immer voll zu nutzen, da mit zunehmender AGR-Rate auch weitere limitierte Emissionen, nämlich die Partikelmasse, der Kohlenmonoxidanteil und die unverbrannten Kohlenwasserstoffe, im Abgas ansteigen können. Eine zukunftsweisende Strategie der Abgasreduzierung muß also noch weitere Faktoren betrachten, auf die hier aber nicht weiter eingegangen werden kann. In diesem Beitrag soll der Teil des Lösungsansatzes vorgestellt werden, der genügend Abgas und Frischluft für eine saubere Verbrennung zur Verfügung stellt

2. Anforderungen an die Aufladung und die Abgasrückführung von Dieselmotoren

Beim Dieselmotor ist das Gassystem nicht nur von entscheidender Bedeutung für die Leistung sondern auch für die Entstehung von Emissionen. Daher ist die Abgasrückführung immer im Zusammenhang mit der Aufladung zu betrachten.

2.1 Aufladung

Zukünftige Dieselmotoren werden gekennzeichnet sein durch große Abgasrückführaten bis an die Vollast, niedrige Verdichtung und ein hohes Ladedruckverhältnis. Es wird zudem ein hohes Drehmoment bei niedrigen Motordrehzahlen angestrebt. Bei der Aufladung dominiert bei den Viertakt Dieselmotoren heutzutage der Abgasturbolader. Mechanische Aufladeaggregate waren bei Dieselmotoren bis in die sechziger Jahre verstärkt im Nutzfahrzeugbereich üblich. Um hohe Aufladegrade zu erreichen, wird nicht nur bei den Großdieselmotoren, sondern auch im PKW-Bereich vermehrt eine mehrstufige Aufladung eingesetzt. Kombinationen von Abgasturboladern und mechanischer Aufladung, wie beim Volvo FL6 D6-250, wurden jedoch nur kurzzeitig angeboten. Mechanische Aufladeaggregate und Kombinationen von Abgasturboladern und mechanischen Ladern sind aber im ottomotorischen Bereich mittlerweile durchaus üblich (Lancia, VW).

2.2 Abgasrückführung

Allgemein im Dieselmotorenbau verbreitet ist die Hochdruckabgasrückführung. Hierbei wird das Abgas für die Rückführung in den Zylinder vor der Turbine des Abgasturboladers entnommen. Dort hat es einen höheren Druck als der Ladedruck und kann daher im Saugrohr des Motors mit der Ladeluft gemischt werden. Dies ermöglicht ein einfaches und

thermodynamisch günstiges System. Es bestehen jedoch folgende Nachteile. Der Massenstrom des Abgases ist abhängig vom Druckgefälle zwischen Auslass- und Einlassseite des Motors. Im hochlastigen Bereich ist daher oft keine AGR möglich, wenn der Ladedruck dort höher ist als der Abgasgegendruck. Die maximale Abgasrückführrate ist je nach Lastpunkt begrenzt und außerdem abhängig von der Ladedruckregelung, was bei instationären Vorgängen zu einer stark schwankenden Abgasrückführrate führen kann. Ventile und Drosseln wie bei [1] beschrieben, lösen das Problem bei Verschlechterung des Wirkungsgrades nur teilweise. Auf der anderen Seite ist im Bereich hoher Abgasrückführraten die Ladedruckerhöhung begrenzt, da dem System "Motor-Turbine" vor der Turbine Massenstrom und damit Energie entzogen wird. Die Turbine kann daher mit höherer Abgasrückführrate weniger Wellenleistung zum Antrieb des Verdichters erzeugen.

Bei der zweiten verbreiteten Variante der Niederdruckabgasrückführung wird das Abgas hinter der Turbine bzw. dem Partikelfilter entnommen und vor dem Verdichter des Abgasturboladers zurückgeführt. Es findet dort eine gemeinsame Verdichtung von Frischluft und Abgas statt. Dieses System benötigt aber für die AGR-Strecke einen Partikelfilter um die Belastung des Abgasturboladers in Grenzen zu halten. Da das Abgas viel Wasser enthält, kann es zu Wasseransammlung durch Kondensation aus der nun bereits vor dem Verdichter mit der AGR vermischten Ladeluft im Ladeluftkühler kommen.

Grundsätzlich ist die Hochdruckabgasrückführung thermodynamisch in den meisten Fällen vorteilhaft wie die Berechnungen von [2] gezeigt haben, da das Abgas schon unter hohem Druck steht und nicht erst entspannt und dann wieder aufwendig verdichtet werden muß. Wie im Kapitel 1 ausgeführt, hängt die NO_x-Produktion stark von der Temperatur ab. Je höher die AGR-Rate ist, desto mehr muß daher das Abgas gekühlt werden, um noch eine positive Wirkung zu erzielen. Damit geht die Energie, die im Abgas steckt, jedoch zum Teil wieder verloren. Besteht also die Notwendigkeit der AGR Kühlung, so kann es günstiger sein, das Abgas erst nach der Turbine, nachdem es einen Teil der Energie schon abgegeben hat und darum kühler ist, zu entnehmen. Das Abgas muß bei dieser Niederdruckabgasrückführung jedoch aktiv gefördert werden. Dies kann, wie beschrieben, gemeinsam mit der Frischluft im Verdichter des Abgasturboladers oder in einer "AGR-Pumpe" stattfinden.

Schon 1979 wird im Patent von Nissan [3] das aktive Fördern der AGR erwähnt. Es gibt seitdem viele Vorschläge in der Literatur, die AGR separat zu verdichten. Bei einem mechanisch angetriebenen Verdichter, wie bei [4] verwendet, muss die Verdichtungsleistung vom Motor erzeugt werden, wodurch der Wirkungsgrad sinkt. Deshalb werden im Großmotorenbau dafür kleine separate Turbolader vorgeschlagen, die nur Abgas verdichten

und durch einen Abgas- oder Ladeluftteilstrom angetrieben werden [5]. Es gibt auch Vorschläge mit zwei getrennten Verdichtern für AGR und Ladeluft, die von einer gemeinsamen Turbine angetrieben werden [6] oder Varianten, bei denen der Kompressor elektrisch angetrieben wird.

Von einer Abgasturbine angetriebene Verdichter erzeugen aber bei kleinen Lasten, geringen Drehzahlen und in Bereichen mit großer Abgasrückführung wenig Ladedruck. Hinzu kommt, dass Strömungsmaschinen, die bauartbedingt bei hohen Drehzahlen arbeiten und deren Schaufeln relativ dünnwandig sind, eine große Empfindlichkeit gegenüber Rußablagerungen, Teilchen und Wassertröpfchen im Strömungsmedium haben.

Es kam daher zur Entwicklung einer "AGR-Pumpe" in Form eines Schraubenverdichters.

3 Erzielung hoher Abgasrückführaten beim Dieselmotor durch aktive Förderung des Abgases

Um die genannten Nachteile zu vermeiden, soll hier eine neues Konzept der Abgasrückführung vorgestellt werden. Bei diesem Konzept handelt es sich um eine Niederdruckabgasrückführung und es wird eine Schraubenmaschine zur aktiven Förderung des Abgases benutzt.

3.1 Der Aufbau der aktiven Förderung

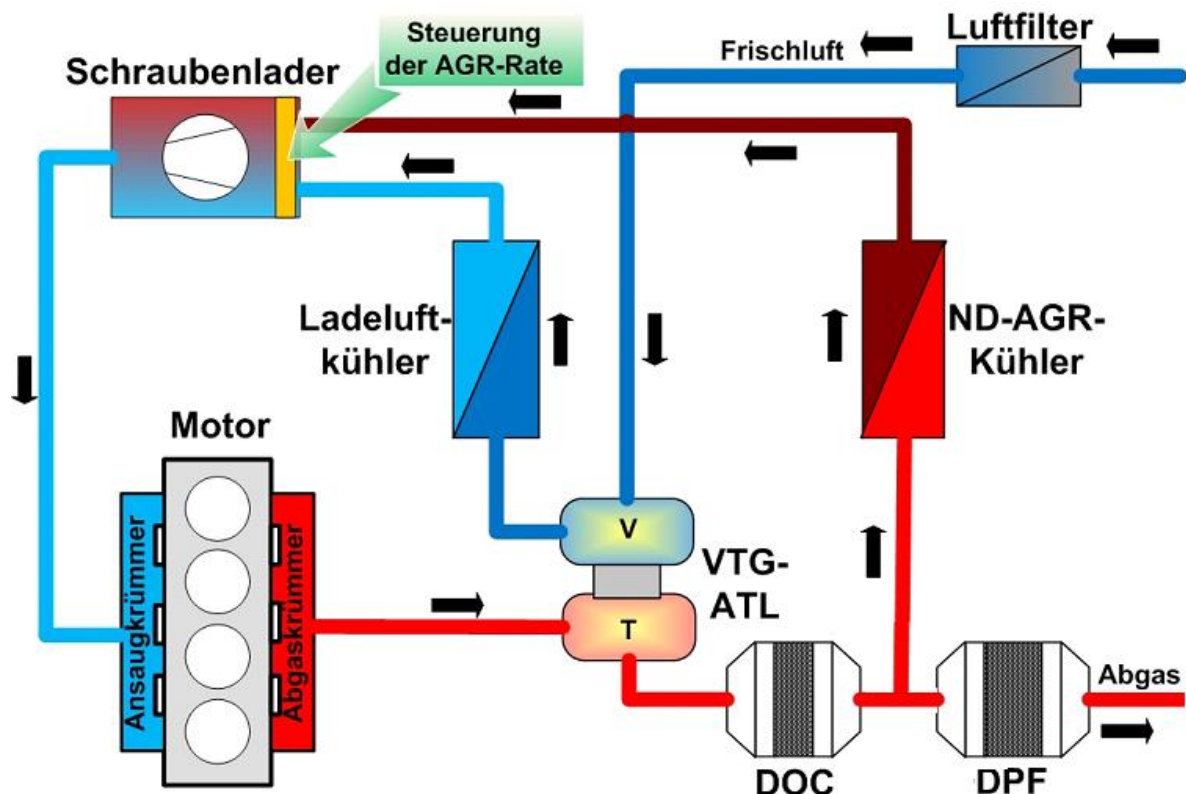


Bild 2 Der schematische Gesamtaufbau

Der Aufbau, der in Bild 2 dargestellt ist, entspricht zunächst der klassischen Anordnung für einen aufgeladenen Dieselmotor. Die Frischluft strömt durch den Luftfilter und wird im Verdichter auf den Ladedruck komprimiert. Das dadurch erhitzte Gas wird im Ladeluftkühler abgekühlt und gelangt über den Ansaugkrümmer zum Motor. Nach dem Motor wird das unter Druck stehende Abgas in der Turbine entspannt und gelangt über den Oxidationskatalysator (DOC) und den Dieselpartikelfilter (DPF) wieder in die Umgebung. Bei dem neuen AGR-Konzept wird das Abgas für die Abgasrückführung nach dem DOC entnommen, in einem separaten Abgaskühler abgekühlt und vom Schraubenlader angesaugt. Die Verwendung einer einfachen Pumpe zum Fördern des Abgases und die Einspeisung über ein T-Stück wurde schnell verworfen, da dabei die beiden Verdichter gegeneinander arbeiten und eine AGR-Regelung fast nicht möglich ist. Der modifizierte Schraubenverdichter bildet das Herzstück des neuen Konzeptes. Er wurde so modifiziert, dass er zwei Einlässe hat. Durch den einen strömt durch den ATL vorverdichtete Frischluft aus dem Ladeluftkühler in den Schraubenlader hinein, durch den anderen gelangt das entspannte Abgas in den Schraubenverdichter. Durch eine Drehschiebersteuerung wird hier die AGR-Rate, also der Abgasanteil am Verbrennungsgas, eingestellt. Das zurückgeführte Abgas und die Ladeluft werden je nach Förderleistung der Schraubenmaschine verdichtet oder entspannt. Vom Verdichter aus wird das Gas direkt zum Motor gefördert. Es ergibt sich so ein einfacher Aufbau mit folgenden Vorteilen.

Das Abgas kann separat in einem säurefesten AGR-Kühler gekühlt werden. Da die Abgasrückführrate mit diesem System weitgehend unabhängig vom Druckgefälle zwischen Abgasgedruck und Ladedruck ist und die Schraubenmaschine das Gasgemisch aktiv verdichten kann, ist es möglich, die Abgasrückführrate in allen Betriebspunkten sehr frei zu wählen. Damit wird auch die Abgasrückführung bei hohen Lasten darstellbar. Da der Schraubenlader mit dem Motor gekoppelt ist, ist die Abgasrückführrate auch im instationären Fall problemlos konstant zu halten. Die Temperatur des Abgases kann im Zuge der Kühlung auch unter den Taupunkt fallen, da der Schraubenlader durch größere Wandstärken und kleinere Drehzahlen der bewegten Bauteile unempfindlicher gegenüber Schmutz, Ablagerungen, Kondensationswasser und Fremdkörper ist als ein Strömungslader. Das System kann außerdem ohne vorgeschalteten Partikelfilter funktionieren. Da dieses System der mechanischen Aufladung auch bei kleinen Drehzahlen ein hohes Druckverhältnis bereitstellen kann, wird durch dieses kombinierte AGR- und Aufladesystem ein schlechter Kaltstart und Kaltleerlauf durch hohe Abgasrückführraten vermieden.

3.2 Quantitäts- und Qualitätsregelung im modifizierten Schraubenverdichterkonzept

3.2.1 Quantitätsregelung

Um das Verhalten des AGR-Konzeptes zu analysieren, ist es gut, sich die Komponenten als eine Reihenschaltung von verschiedenen Strömungsmaschinen vorzustellen, wie in Bild 3 dargestellt. In Strömungsrichtung beginnt die Reihe mit dem Verdichter des Turboladers. Danach ist die Schraubenmaschine angeordnet und als drittes Bauteil durchströmt das Gas den Verbrennungsmotor, der sich prinzipiell auch wie ein Verdichter verhält. Der Druck, der im Motor erzeugt wird, entspannt sich schließlich wieder in der Turbine des Turboladers. Die Drücke p_1 bzw. p_4 (gemäß Bild 3) sind bekanntermaßen von den Umgebungsbedingungen sowie der Ansaug- und Abgasstrecke abhängig. Die Drücke p_2 und p_2^* stehen hingegen im engen Zusammenhang mit den Massenströmen Q_2 und Q_2^* . Für einen definierten Betriebspunkt ergibt sich zwischen der drehzahlabhängigen Motorschlucklinie und der Verdichterkennlinie auf Basis des gemeinsamen Volumenstroms ein Verdichterdruckverhältnis. Der Verdichter des Turboladers fördert bei sich einstellender Drehzahl und unter gegebener Dichte (Ladungstemperatur) einen festen Massenstrom. Ist der Strom nun transient größer als das Schluckvermögen der dahinter liegenden Komponente steigt der Druck p_2^* , ist er niedriger sinkt der Druck p_2^* . Die Schraubenmaschine fördert dabei je Umdrehung ein bestimmtes Volumen. Der Verbrennungsmotor als Hubkolbenpumpe fördert ebenso abhängig von der Motordrehzahl immer ein bestimmtes Volumen (entsprechend der Motorschlucklinie). Soll der Massenstrom nun bei fester Drehzahl erhöht werden, muß somit der Druck steigen oder die Temperatur gesenkt werden. Wenn sich also der Druck p_2^* verdoppelt, fördert der Motor auch die zweifache Luftmenge. Die Verbrennung von Kraftstoff im Motor erhöht schließlich die Temperatur im Abgas und bei gleichbleibendem Massenstrom über den Motor kann sich dadurch der Druck p_3 erhöhen. Nur so steht genügend Druckgefälle von p_3 nach p_4 zur Verfügung, um die Turbine und damit letztlich den Verdichter des Turboladers anzutreiben. Die Regelung des Ladedruckes ist also insbesondere im transienten Betrieb eigentlich eine Massenstromregelung. Beim Turbolader geschieht dies durch Verstellen der Leitschaufeln vor der Turbine oder eine Verringerung des Massenstroms über die Turbine mit einem Ventil, dem "waste gate". Damit wird die Drehzahl des Verdichters und damit der Massenstrom verändert, dieser bestimmt letztlich den Ladedruck. Im stationären Betrieb benötigt der modifizierte Schraubenlader keine Massenstromregelung wenn er eine feste Drehzahlkopplung mit dem Verbrennungsmotor hat. Es ergibt sich über das gesamte Drehzahlband immer ein ähnlicher Massenstromverlauf wie der des Verbrennungsmotors.

Steigt der Ladedruck, der vom ATL erzeugt wird, an, so steigt die Förderleistung der Schraubenmaschine auch und der höhere Massenstrom wird an den Verbrennungsmotor weitergegeben. Durch die Drehzahlübersetzung vom Schraubenlader zum Verbrennungsmotor kann der Massenstrom durch den Schraubenlader relativ zum Massenstrom des Verbrennungsmotors eingestellt werden. Es ergibt sich ein nahezu festes Druckverhältnis über den Schraubenlader, das auch dann bestehen bleibt, wenn der Massenstrom insgesamt steigt. Steigert also der Verdichter des Turboladers durch Drehzahlerhöhung den Massenstrom, dann steigert der Schraubenlader durch den höheren Vordruck auch sein Liefervermögen. Wenn der Schraubenlader in erster Linie zur Erhöhung der Abgasrückführung genutzt wird, genügt durch diese günstige Fördercharakteristik eine feste Übersetzung.

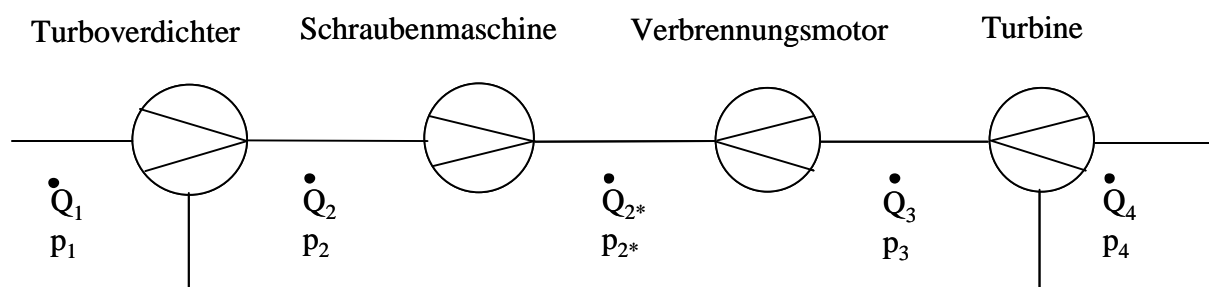


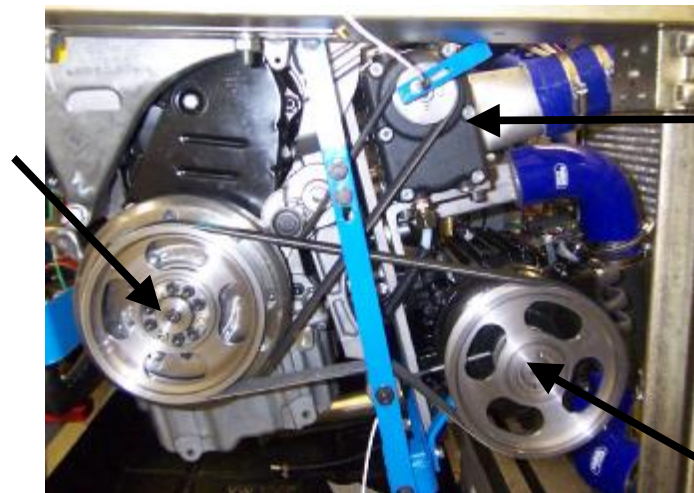
Bild 3 Schema der drei Komponenten

Soll der Schraubenlader zusätzlich zur temporären Erhöhung des Ladedruckes genutzt werden, sind weitere Maßnahmen nötig.

Im Laufe der Entwicklung des AGR-Konzeptes wurden verschiedene Möglichkeiten der Mengenregelung getestet und mit Hilfe der Motorprozesssimulation Themos© bewertet. Drehschieber wie bei [7] und [8] zur Mengenregelung einzusetzen, erwies sich nicht als zielführend. Es zeigte sich, dass mit einer Drehzahlregelung die besten Ergebnisse erzielt werden. Für die Drehzahlverstellung gibt es die Möglichkeit eines direkten elektrischen Antriebes des Schraubenladers. Die benötigte Antriebsleistung erfordert jedoch einen großen Motor und eine Stromversorgung, die eine große elektrische Leistung zur Verfügung stellen kann. Für einen Fahrzeugeinsatz ist diese Variante nicht gut geeignet. Ein Antrieb über den Verbrennungsmotor mit einem Getriebe mit variabler Übersetzung wurde wegen des großen Bauraumbedarfs nicht weiter verfolgt. Da im Riementrieb des

Verbrennungsmotors immer eine Elektromaschine verbaut ist, und zwar als Generator, lag die Idee nahe, diesen auch als Elektromotor zu nutzen. Als Kopplung mit dem Motor wurde ein Planetenradgetriebe entwickelt, welches den Leistungsbedarf der Schraubenmaschine auf den Verbrennungsmotor und den Elektromotor aufteilt. Das Getriebe ist so ausgelegt, dass zwei Drittel der Leistung durch den Verbrennungsmotor aufgebracht wird und nur ein Drittel vom Elektromotor. Der relativ kleine Motor übernimmt nur diesen restlichen Leistungsbedarf und die Drehzahlverstellung. Innerhalb des Planetengetriebes ist ein Freilauf angeordnet, der dafür sorgt, dass die Drehzahl im Planetengetriebe nicht unter die Motordrehzahl fällt. Die Elektromaschine wird dann auch vom Verbrennungsmotor angetrieben und arbeitet als Generator, um die Batterien zu laden. Der Schraubenlader kann damit auch nicht unter die Drehzahl der festen Übersetzung fallen und benötigt daher auch

Planetenrad-
getriebe in der
Riemenscheibe



Schraubenlader
mit AGR-
Regelung

E-Motor und
Generator

Bild 4 Der Riementrieb mit E-Motor und Schraubenlader auf dem Motorprüfstand. keinen aufwendigen Bypass oder gar eine Kupplung, die den Schraubenlader abkuppelt. Das Bild 4 zeigt die praktische Ausführung der in den Riementrieb des Motors integrierten Drehzahlverstellung. Als Basis des modifizierten Schraubenlader wurde ein Opcon OA 1040 der schwedischen Firma Lysholm verwendet.

3.2.2. Qualitätsregelung

Die besondere Eignung der modifizierten Schraubenmaschine als AGR-Pumpe ergibt sich durch die Möglichkeit, die AGR-Rate, also die Qualität des Verbrennungsgases, einzustellen. Der Schraubenlader bildet durch die ineinandergreifenden Rotoren Arbeitsräume die zyklisch ihr Volumen vergrößern und verkleinern. Die einzelnen Arbeitsräume sind voneinander getrennt. Die Zuströmung erfolgt axial von der Stirnseite. Durch diese Eigenschaften eignet sich der Schraubenlader besonders gut für die Verwendung als AGR-Misch- und

Fördereinheit. Dies soll am schematischen Bild 5 verdeutlicht werden. Über dem Drehwinkel ist hier das Volumen aufgetragen. Durch Drehung der Rotoren bilden sich die veränderlichen Arbeitsräume. In das sich vergrößernde Volumen des Arbeitsraumes strömt zunächst durch die erste axiale Öffnung das nach der Turbine entnommene und somit entspannte Abgas ein. Mit weiterer Drehung überstreichen die Zähne der Rotoren die Steuerkanten des Regelschiebers und die erste Öffnung wird für diesen Raum wieder geschlossen. Die Breite des Steuerschiebers ist so gewählt, dass es zu keinem Kurzschlussstrom kommen kann wenn sich die Kammer mit der weiteren Drehung zum zweiten Einlass hin öffnet. Durch diesen Einlass strömt die vorverdichtete Frischluft in die, schon mit dem Abgas gefüllte, Kammer und beide Gase vermischen sich. Das Gasgemisch wird mit der weiteren Drehung der Rotoren und der Verkleinerung der Arbeitsräume verdichtet und zum Motor hin ausgeschoben. Der Regelschieber ist beweglich angeordnet und kann daher das Verhältnis von AGR und Frischluft beeinflussen.

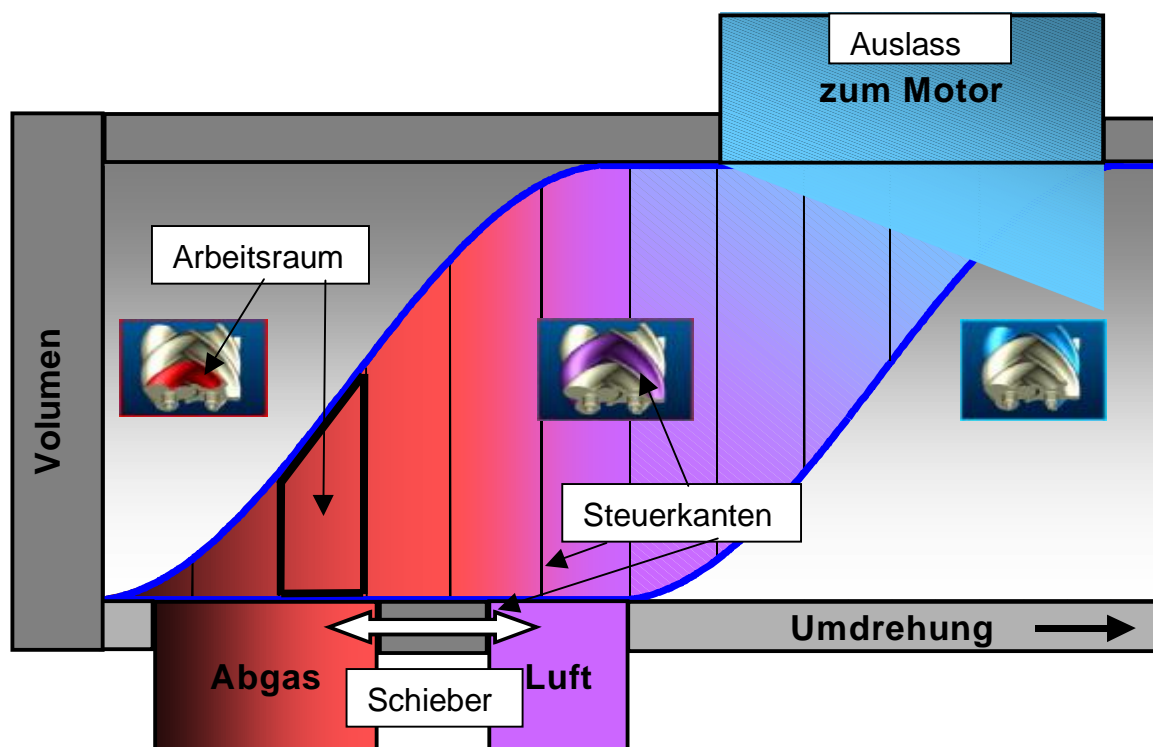


Bild 5 Der schematische Aufbau der Qualitätsregelung

Das Regelorgan ist in dem Bild 6 zu sehen. Das Bild zeigt die Drehschieber in der praktischen Umsetzung und schemenhaft die Stirnseite der Rotoren. Die Regeleinheit besteht aus zwei Drehschiebern die vor den Einlässen der Rotoren angeordnet sind. Sie bilden mit den Zähnen der Rotoren Steuerkanten und teilen die Einlassfläche in zwei

Bereiche, einen Abschnitt fürs Abgas und einen für die Frischluft. Wie beschrieben decken sie jeweils eine Zahnücke ab, damit es nicht zu einer Querströmung der Ladeluft in die AGR-Strecke kommt. Die Drehschieber sind auf den Rotorachsen drehbar befestigt und können so entweder den Abgas- oder den Frischluftanteil vergrößern oder verkleinern.

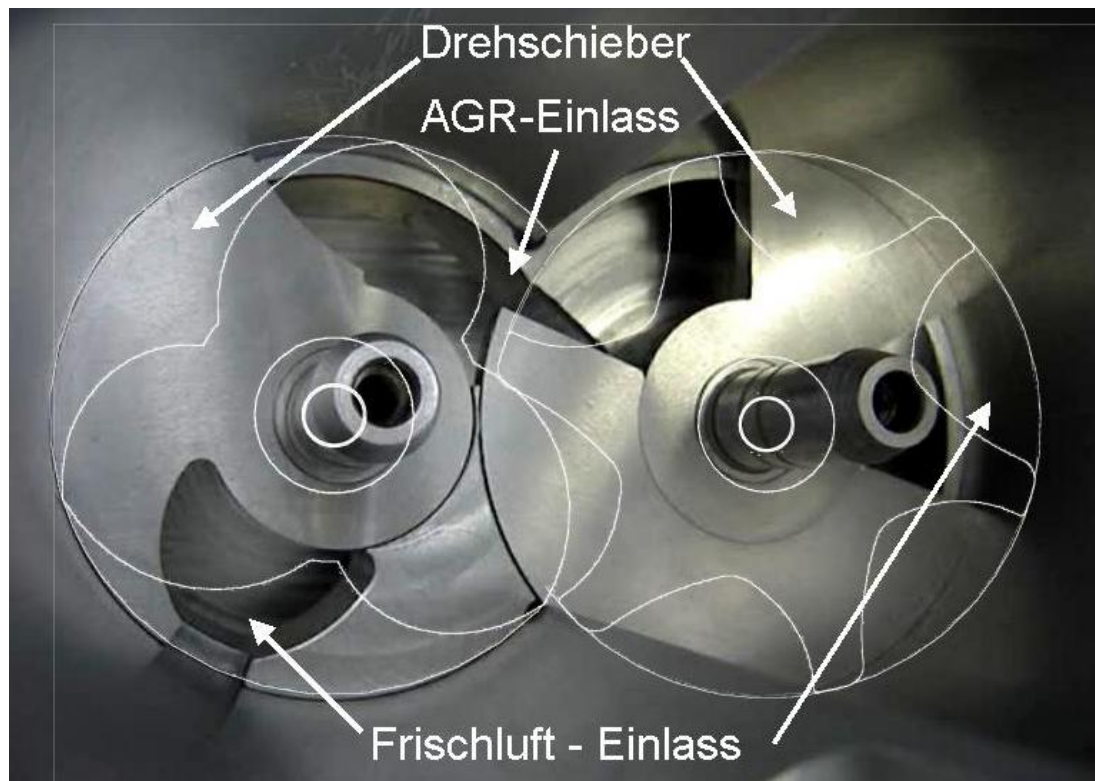


Bild 6 Die praktische Ausführung der Drehschieber.

3. Erprobung am MPST

Bei den bisher verwendeten Abgasrückführkonzepten wird die Frischluft durch Abgas ersetzt. Damit steigt in der Regel die emittierte Rußmasse an, da der Restsauerstoffanteil sinkt. Daher war der erste Ansatz der neuen Entwicklung den Restsauerstoffgehalt konstant zu halten, um die Oxidation des Rußes auch bei hohen AGR-Raten zu ermöglichen. Dazu war mit der Erhöhung der AGR -Rate auch der Ladedruck zu erhöhen. Der AGR Anteil wurde, wie bei [9] beschrieben, nicht ersetzt, sondern ergänzt. Bild 7 zeigt die Strategie der neuen Abgasrückführung an einem definierten Betriebspunkt. Zunächst reicht es, die Frischluft durch AGR zu ersetzen. Der Frischluftanteil darf aber nicht unter einen Grenzwert fallen, um eine vollständige Verbrennung noch sicher zu gewährleisten. Um den Abgasanteil dennoch zu erhöhen, muss daher die AGR zusätzlich dem Brennraum zugeführt werden wie bei [9] für Gasmotoren beschrieben worden ist. Dieser zusätzliche Massenstrom in den Motor bedingt eine Druckerhöhung p_2^* (nach Bild 3) vor dem Motor. In dem hier

beschriebenen Konzept wird dazu die Drehzahl des Schraubenladers erhöht. Der Turbolader erzeugt für einen konstanten Betriebspunkt einen konstanten Druck p_2 (nach Bild 3) und fördert damit nahezu den gleichen Massenstrom.

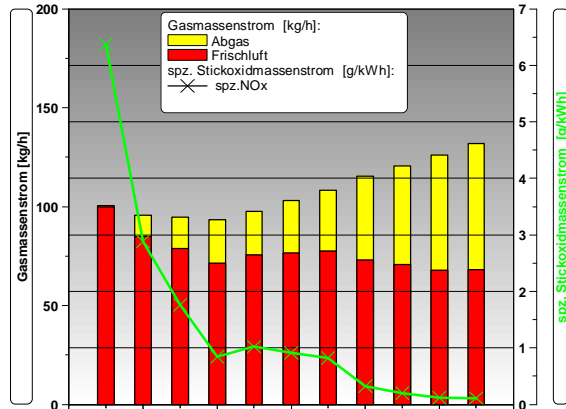


Bild 7 AGR-Raten Variation

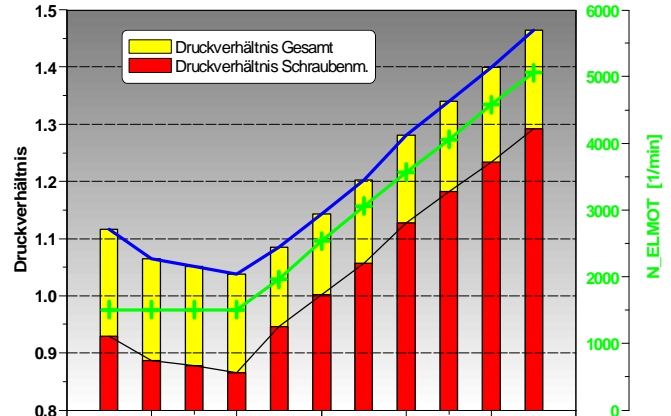


Bild 8 Drehzahlen und Druckverhältnisse

Der zusätzliche Abgasmassenstrom wird nun vom Schraubenlader gefördert. Damit haben wir eine additive Abgaszumischung. In Bild 8 ist an den gelben Balken zu sehen, wie das Druckverhältnis p_2-p_1 über den Abgasturbolader gleich bleibt aber das Druckverhältnis $p_2^*-p_2$ über dem Schraubenlader ansteigt. Dies ist an den roten Balken zu erkennen. Die Grundübersetzung war in diesem Fall so gewählt, dass das Druckverhältnis über dem Schraubenlader kleiner 1 ist, also eine Entspannung der Gase stattfindet. Erst mit zunehmender Drehzahl des E-Motors und damit des Schraubenladers steigt das Druckverhältnis über 1 bis zu einem Druckverhältnis von 1,3.

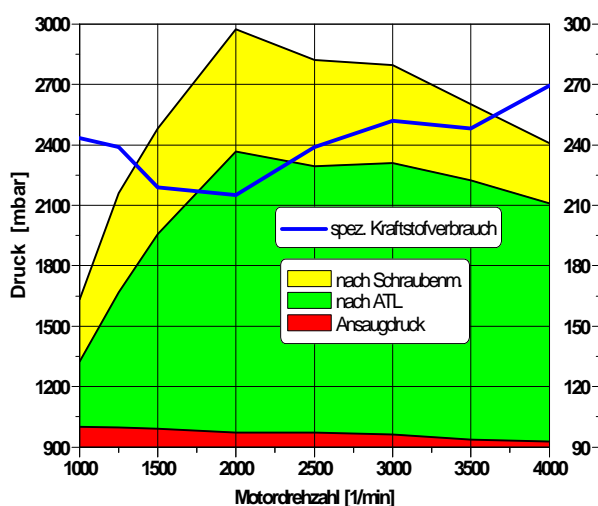


Bild 9 Druckverhältnisse $i=3,6$

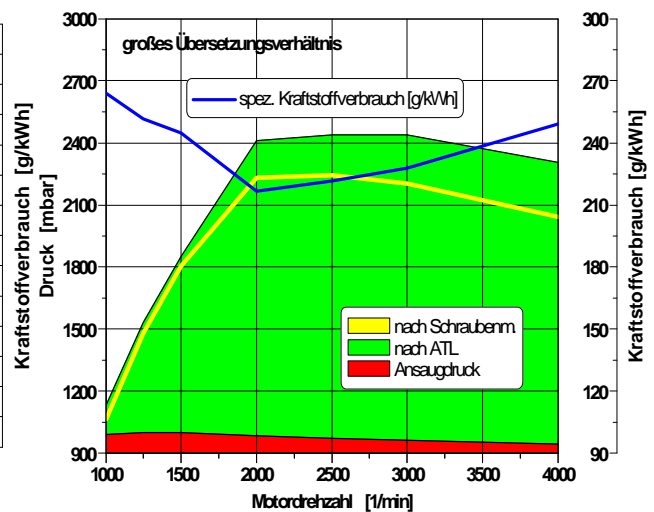


Bild 10 Druckverhältnisse $i=2,5$

Die Bilder 9 und 10 zeigen die Vollastladedrücke in der Ansaugleitung eines Dieselmotors bei verschiedenen Grundübersetzungen zwischen Motor und Schraubenlader. Bei einer mehr als dreieinhalbfachen Drehzahl des Schraubenladers ergibt sich eine deutliche Drucksteigerung (gelber Bereich) während sich bei einer Übersetzung von 2,5 eine Entspannung über den Schraubenlader ergibt. Dies zeigt die Variationsbreite, die sich allein aus der Wahl der Riemenscheibengröße ergibt.

Ein Ziel des Konzeptes ist es, hohe AGR-Raten in einem weiten Kennfeldbereich darzustellen. Dazu sollen zwei Beispiele gezeigt werden.

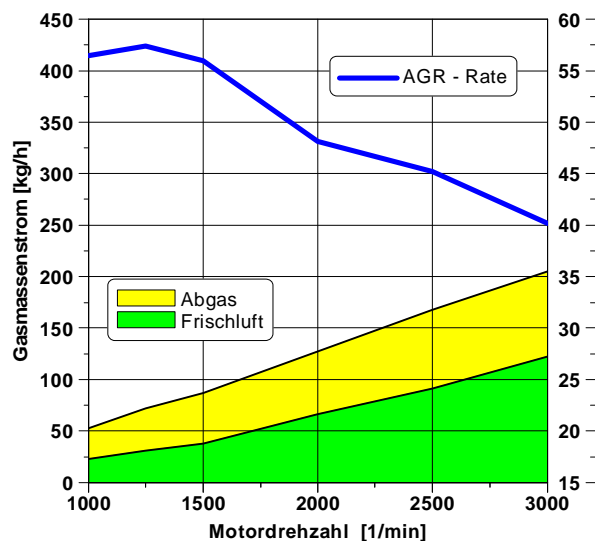


Bild 11 Gasmassenströme

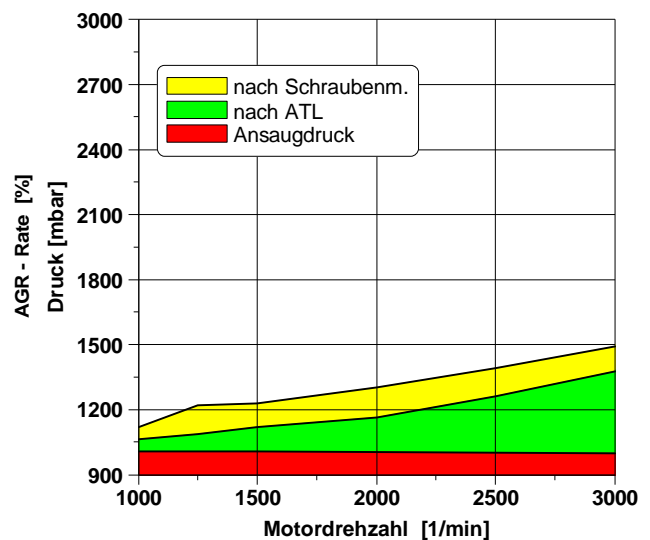


Bild 12 Gasdrücke

Das erste Beispiel zeigt in Bild 11 und Bild 12 für die Abgasrückführung über der Motordrehzahl die Verhältnisse bei geringen Motormomenten. Bei niedrigen Druckverhältnissen ist es möglich auch hohe AGR-Raten darzustellen. Der Schraubenlader arbeitet mit einem Übersetzungsverhältnis von 1 zu 3,6. Er saugt bei einer AGR-Rate von 50% etwa genauso viel Abgas an wie Frischluft. Weiterhin erhöht er den Ladedruck des Motors um ca. 100mbar gegenüber dem Druck nach ATL-Verdichter. Der Abgasmassenstrom liegt bei diesem Beispiel motordrehzahlabhängig zwischen 25 kg/h und 75 kg/h.

Das zweite Beispiel zeigt in Bild 13 und Bild 14 die Verhältnisse bei hoher Lastabgabe des Motors nahe der Vollast mit den entsprechenden hohen Ladedrücken. Hier sind die Verhältnisse deutlich ungünstiger. Der Abgasmassenstrom liegt immer noch hoch zwischen 20 kg/h und 55 kg/h. Die AGR-Rate ist jedoch wegen des insgesamt höheren Frischluftmassenstromes entsprechend kleiner. Hier ist deutlich zu erkennen, dass es mit dem Konzept der AGR Förderung mit einem Schraubenlader möglich ist, Abgas mit nahezu Umgebungsdruck, also rd. 1000 mbar, anzusaugen, auf den Ladedruck von 2300 mbar zu

verdichten und der Frischluft beizumischen. Der Druck im Saugrohr steigt nach dem Schraubenlader nochmals bis auf rd. 2800 mbar an, da nun ein höherer Massenstrom dem Motor zugeführt wird.

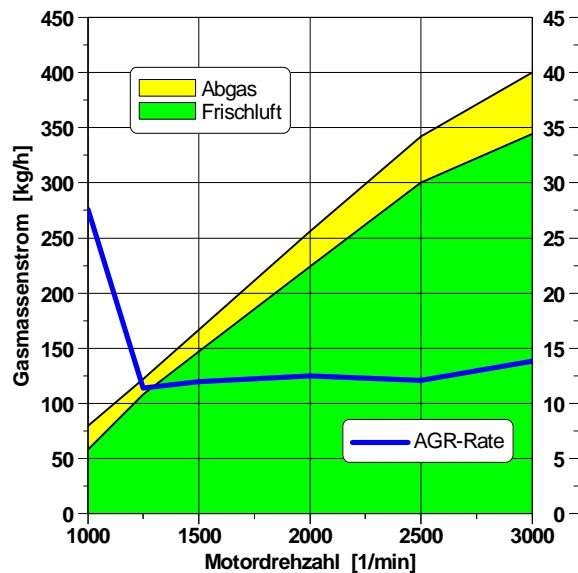


Bild 13 Gasmassenströme

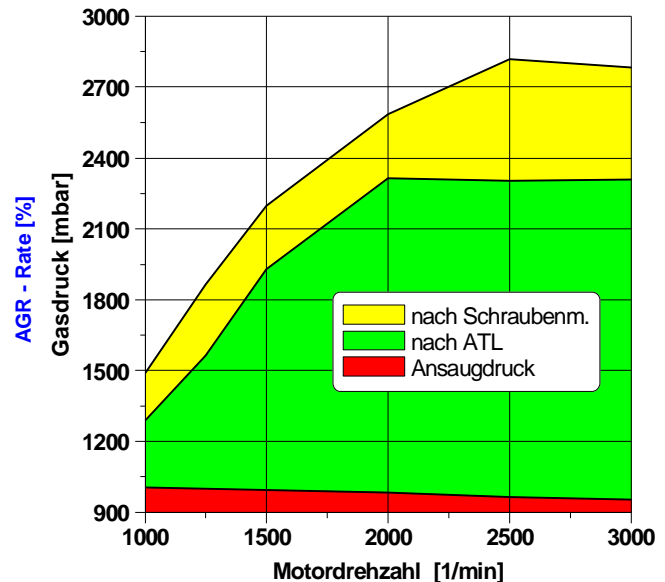


Bild 14 Gasdrücke

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich ein Schraubenlader hervorragend als "AGR Pumpe" eignet. Durch sein Arbeitsverfahren mit gegeneinander abgeschlossenen Kammern lassen sich in ihm zwei Gase mit unterschiedlichen Eingangsdrücken nahezu unabhängig voneinander ansaugen, mischen und verdichten. Die für die Qualitätsregelung ausgelegte Drehschiebersteuerung wurde erfolgreich getestet. Durch die Drehzahlsteuerung über ein Riemenscheibenplanetenradgetriebe lassen sich, wie gezeigt, im Sinne der Quantitätsregelung die drei Komponenten Turbolader, Schraubenlader und Verbrennungsmotor sehr gut aufeinander abstimmen. Nach vielversprechenden Konzeptuntersuchungen zum Nachweis stationärer Potentiale unter Berücksichtigung der Einflüsse auf den motorischen Gesamtwirkungsgrad ist nun zeitnah die Umsetzung des Konzeptes in ein Fahrzeug geplant, um speziell die dynamischen Vorteile ‚erfahrbar‘ zu machen.

Literaturverzeichnis

- [1] Warth, M. , "Neue Systeme zur Darstellung höchster AGR-Raten für zukünftige Nutzfahrzeug-Dieselmotoren", MTZ Konferenz : Ladungswechsel im Verbrennungsmotor Stuttgart: November 2007
- [2] Schutting, E. "Bewertung neuer Luftführungsstrategien mit den Mitteln der eindimensionalen Simulation " , Motorprozesssimulation und Aufladung II, Berlin 2007
- [3] Ushimura Shoji, Yokosuka Kanagawa; Nissan Motoe Co., Ltd „Abgasrezirkulationsvorrichtung für einen Brennkraftmotor“ Patent DE 3019607 1979
- [4] Uchida,N; Daisho, Y. ; Saito, T. ; Sugano,H. "Combined Effects of EGR and Supercharging on Diesel Combustion and Emissions"SAE paper 930601
- [5] Berg-Sonne Peter, MAN B&W, Malmö Schweden „AGR–Pumpen Antrieb durch Ladedruck“ Patent DE103 31 187 A1 2005
- [6] Blake James Edward, Calif. US. Allied Signal Inc. "Turbocharger with integrated Exhaust Gas Recirculation Pump ". US Patent 6050095 2000
- [7] Johnny Oscarsson "Regulation device for a screw rotor maschine for supercharging internal combustion enines" Patent WO 95/02766 1995
- [8] von Rüden,Klaus " Beitrag zum Downsizing von Fahrzeug-Ottomotoren" TU Berlin Diss. 2004
- [9] G. McTaggart-Cowan, W. K. Bushe P. G. Hill and S. R. Munshi "Nox reduction from a heavy-duty diesel engine with direct injection of natural gas and cooled exhaust gas recirculation" 191 Int. J. Engine Res. ; Vol. 5 ; No. 2