

# Die GASSCREW

## Experimentelle Verifikation des Gaserzeugerbetriebes

Prof. Dr.-Ing. **K. Kauder**, Universität Dortmund, Dortmund;  
Dipl.-Ing. **V. Huber**, E.On Kernkraft GmbH, Grafenrheinfeld

### Kurzfassung

Aufbauend auf die Forschungsarbeiten der Universität Dortmund wird hier über den Betrieb der GASSCREW, also über die Zusammenarbeit von Schraubenmotor und Schraubenverdichter berichtet. Ziel ist es zunächst, den Gaserzeugerbetrieb, also die Arbeitsgasversorgung des Motors ausschließlich durch den Verdichter sowie die Leistungsversorgung des Verdichters in direkter mechanischer Kopplung zu erreichen. Der Gaserzeugerbetrieb konnte nicht ganz erreicht werden, jedoch liegen nunmehr wichtige Betriebserkenntnisse für die weitere Entwicklung der GASSCREW bis hin zur Leistungsabgabe jenseits des Gaserzeugerbetriebes vor.

### Abstract (optional)

Constitutive to comprehensive Research and Development activities at the University of Dortmund the interaction between screw-type motor and screw-type compressor, called GASSCREW, was researched. The aim was the achievement of the gas-generating operation, the air pressure supply of the screw-type motor by the screw-type compressor as well as the power supply of the screw-type compressor by the screw-type motor in direct mechanical interconnection. This target could not be reached, however in this article important operation awarenesses are presented for a further development of the GASSCREW. The aim is the operation beyond the gas-generating operation point with power output.

### 1. Einleitung

Nachdem bereits die Vorteile des GASSCREW-Prozesses in [1] theoretisch behandelt wurden und auch experimentelle Ergebnisse des Schraubenmotorbetriebsverhaltens vorliegen [2], folgt als dritter Schritt die experimentelle Untersuchung der Gesamtanlage der GASSCREW, zunächst um die Möglichkeit des Gaserzeugerbetriebes zu verifizieren.

## 2. Versuchsanlage

Der Aufbau der GASSCREW ähnelt dem einer einwelligen Gasturbinenanlage im regenerativen Jouleprozess mit quasi isothermer Verdichtung, bedingt durch einen innengekühlten Schraubenverdichter [1].

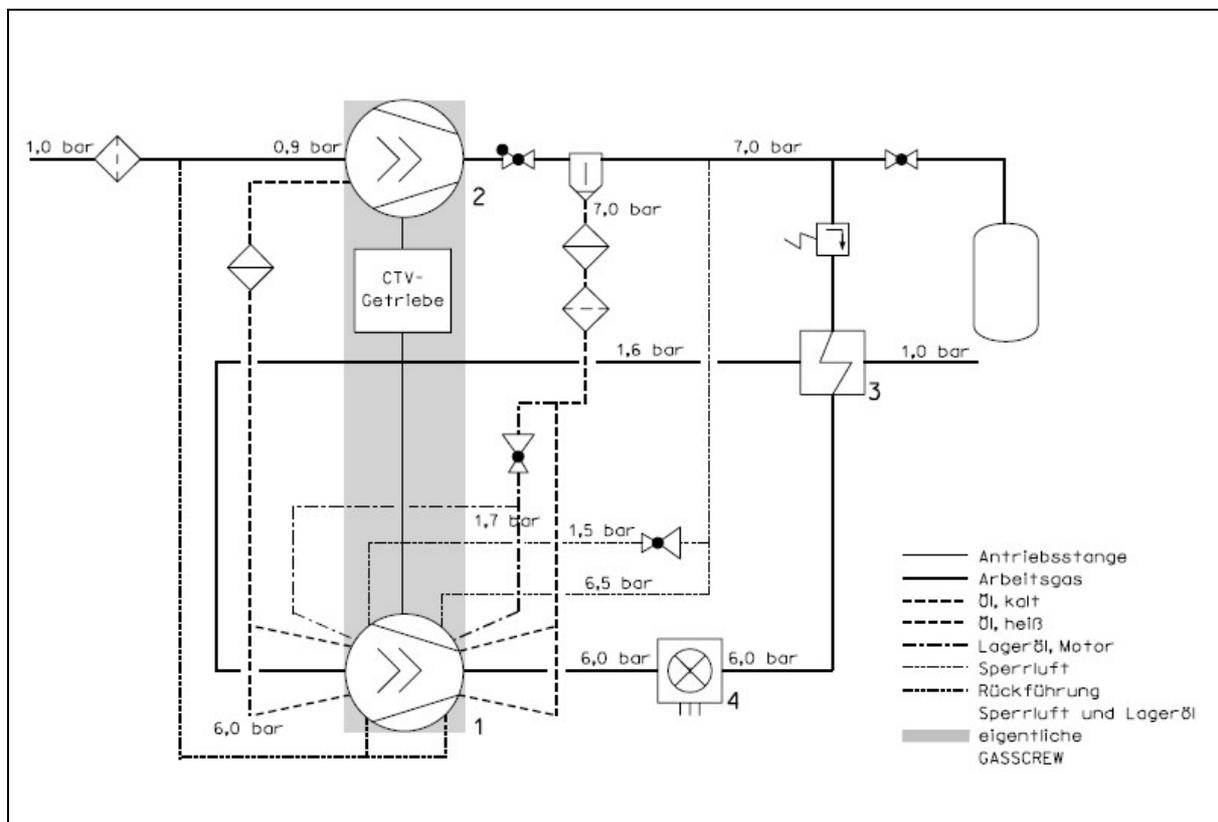


Bild 1: Schaltung der GASSCREW-Versuchsanlage

- |                       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| 1 Schraubenmotor      | 3 Wärmetauscher (Rekuperator) |
| 2 Schraubenverdichter | 4 Lufterhitzer, elektrisch    |

Die untersuchte Schaltung der GASSCREW entnimmt man **Bild 1**, den Anlagenaufbau **Bild 2**.

Den Gaserzeugerbetrieb, also die Druckluftversorgung des Schraubenmotors durch den Schraubenverdichter bei Leistungsgleichheit beider Maschinen zu untersuchen, war Ziel der Experimente.

Beide Maschinen werden in variablen Zusammenarbeitspunkten untersucht. Darüber hinaus sind beide Schraubenmaschinen indiziert, um die Energiewandlung nicht nur integral beurteilen zu müssen.

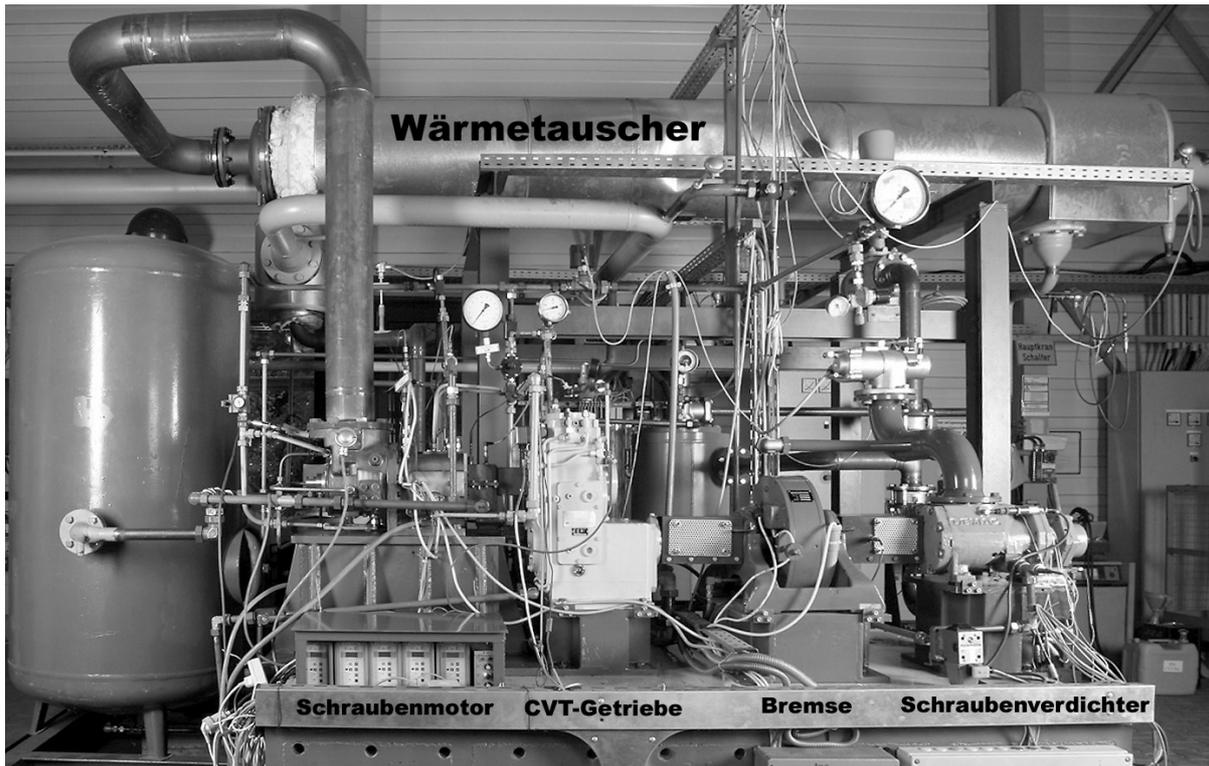


Bild 2: Versuchsanlage GASSCREW

### 3. Durchgeführte Untersuchungen

#### 3.1 Kennfeld Schraubenmotor

Um das Maschinenverhalten getrennt bewerten zu können, wird zunächst der Motor ohne einen Verdichter betrieben und ein Kennfeld aufgenommen. **Bild 3** zeigt die gemessenen Drehmomente als Funktion der Hauptrotordrehzahl des Motors für verschiedene Motoreintrittsdrücke und -temperaturen mit Linien konstanter Leistung. Nahezu linear abfallenden Geraden sind signifikant für das Drehmoment-Drehzahl-Verhalten von Verdrängermaschinen.

Eine reproduzierbare Abhängigkeit des Motormomentes von der Motoreintrittstemperatur ist kaum erkennbar, hingegen bleibt der Motoreintrittsdruck erwartungsgemäß der signifikante Einflussparameter. Mit steigender Drehzahl sinkt das Drehmoment bei konstantem Motoreintrittsdruck.

Diese Wirkung beruht insbesondere bei niedrigen Motoreintrittsdrücken auf einer mit steigender Drehzahl unvollständigeren Kammerfüllung aufgrund der geringeren zur Verfügung stehenden Zeit. Dies belegen auch die sinkenden maximalen Kammerdrücke der Indikator-

diagramme bei konstanten Eintrittsdrücken und steigenden Hauptrotorumfangsgeschwindigkeiten, **Bild 3**.

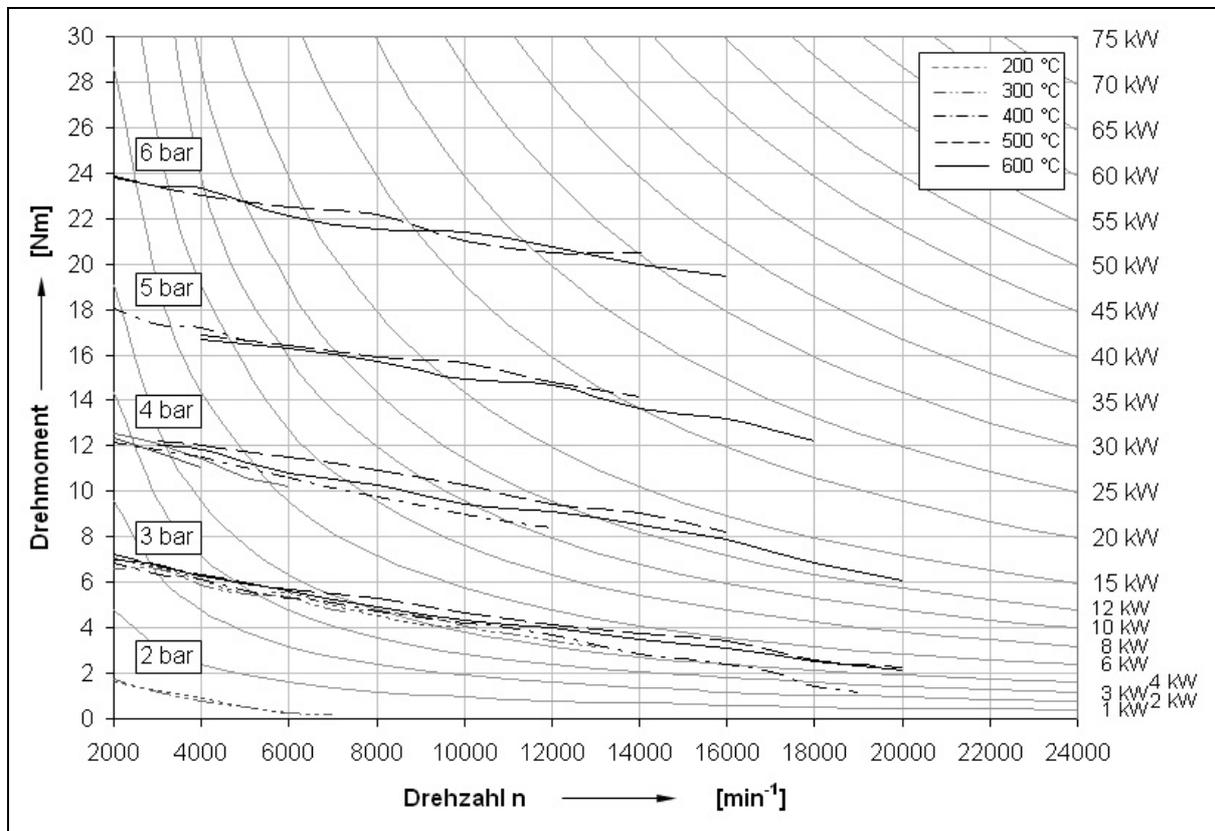


Bild 3: Gemessene Drehmomente  $M_d$  des Schraubenmotors als Funktion der Hauptrotordrehzahl ohne Verdichterantrieb für verschiedene Motoreintrittsdrücke und -temperaturen

Parameter: Motoreintrittstemperatur, Kurven konstanter Leistung

Die Verluste durch eine unvollständige Kammerfüllung sind geringer als die Dissipation der hydrodynamischen Gleitlager. Messungen mit einer unprofilierten Dummywelle, deren einzige Leistungsaufnahme durch die Lager verursacht wird, zeigen eine mit der Drehzahl überproportionale Leistungsaufnahme der Gleitlager, **Bild 4**.

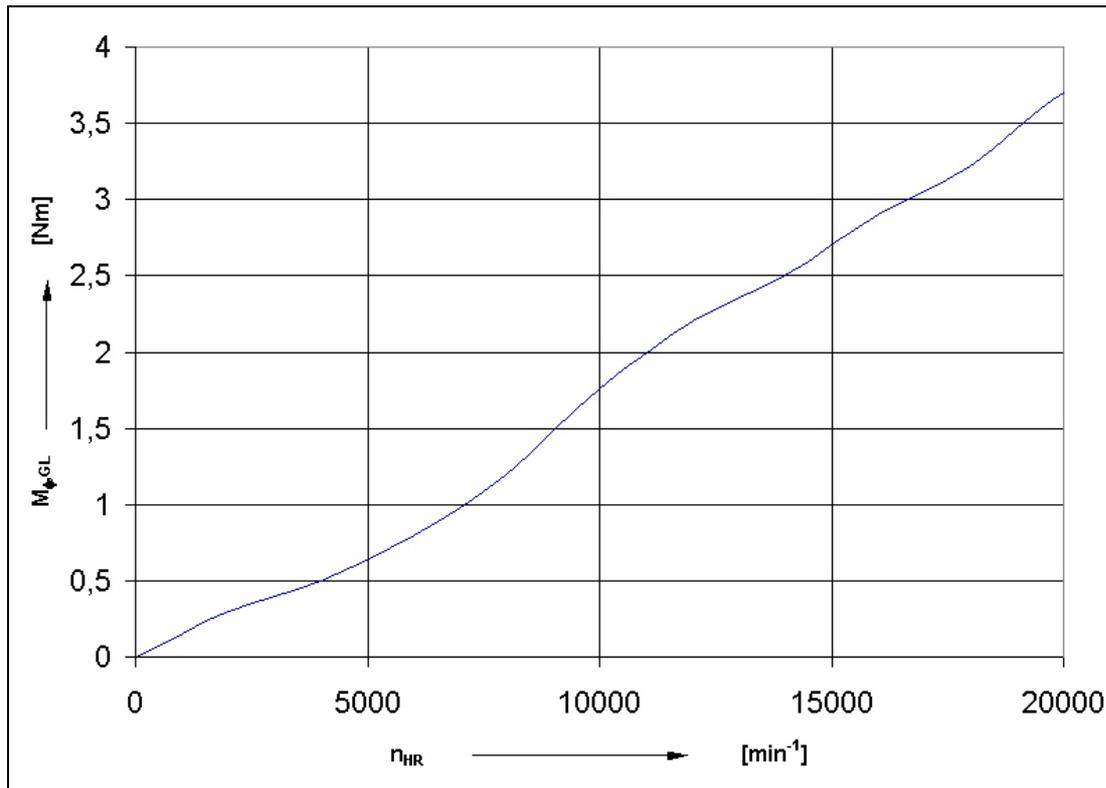


Bild 4: Lagerverlustmoment  $M_{\phi, GL}$  summiert über alle Lager des Schraubenmotors

### 3.2 Austrittstemperatur Schraubenmotor

Steigende Motoreintrittstemperaturen verschieben den Verlauf der Motoraustrittstemperatur in erster Näherung parallel hin zu höheren Werten. Aus größeren thermischen Dehnungen entstehen bei höheren Motoreintrittstemperaturen geringere Spalthöhen und damit auch verminderte Spaltmassenströme. Die Motoraustrittstemperatur sinkt bei höheren Motoreintrittstemperaturen mit ansteigenden Gradienten. So strömen bei thermisch gering belasteten Rotoren durch größere Spaltquerschnitte mehr höhere Spaltmassenströme in die vorlaufenden Kammern, als dies nahe des derzeit thermischen Auslegungspunktes von  $\vartheta_{M,E} = 600 \text{ °C}$ , bei dem die Spalte im Motor theoretisch minimiert sind, zu beobachten ist. Die Kurven bei niedrigerer Motoreintrittstemperatur verlaufen für gleiche Druckverhältnisse dann flacher. Gemittelt über die  $300 \text{ °C}$ -Kurvenschar ist eine nahezu konstante Motoraustrittstemperatur zu beobachten, höhere Temperaturen  $\vartheta_{M,E} \geq 500 \text{ °C}$  liefern mit steigender Drehzahl eine durchweg fallende Tendenz der Motoraustrittstemperatur.

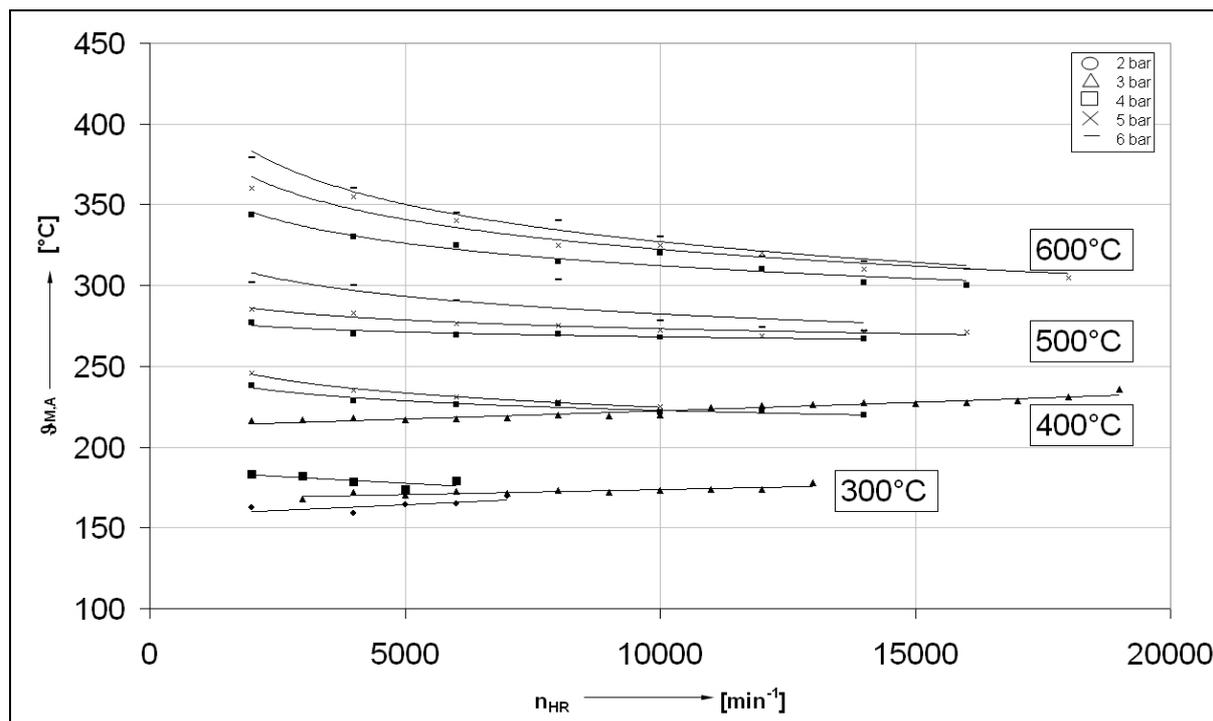


Bild 5: Gemessene Motoraustrittstemperaturen  $\vartheta_{M,A}$  als Funktion der Hauptrotordrehzahl  $n_{HR}$   
 Parameter: Motoreintrittstemperatur  
 Motoreintrittsdruck

Steigende Motordrehzahlen reduzieren für gleiche Motoreintrittstemperaturen die Spaltmassenströme wegen abnehmender Arbeitsspielzeiten ebenfalls. Dies zieht dann abnehmende Motoraustrittstemperaturen bei steigenden Drehzahlen nach sich.

Die Motoraustrittstemperatur wird primär von den Motoreintrittsdrücken bestimmt. Das geometrisch festgelegte innere Volumenverhältnis  $v_i = 2,5$  des Motors expandiert den Kammerinhalt nach **Gl. (1)**. Steht bei Kammerabschluss zur Druckseite ein Druckverhältnis

$$\Pi < v_i^{\bar{n}} \quad \text{Gl. (1)}$$

an, so expandiert der Kammerinhalt unter den Motoraustrittsdruck, wobei in der Kammer im Moment der Kammeröffnung ein Druck unter dem Umgebungsdruck herrscht. Der Kammerinhalt wird also bei dieser Überexpansion durch rückströmendes Gas auf Austrittsdruck mit ansteigender Temperatur nachverdichtet. Dies ist der bei niedrigen Motoreintrittstemperaturen dominante Einfluss, der zusammen mit hohen Spaltmassenströmen für einen Anstieg der Motoraustrittstemperatur mit der Drehzahl sorgt.

**Bild 6** verdeutlicht die Abhängigkeit der Motoraustrittstemperatur vom anliegenden Motor-druckverhältnis  $\Pi$ . Die hier betrachteten Druckverhältnisse liegen insgesamt oberhalb des

angepassten Betriebes, im Moment der Kammeröffnung ist der Kammerdruck noch größer als der Austrittsdruck, wobei es zu deutlichen Nachexpansionen mit der damit verbundenen Temperaturreduzierung kommen sollte. Dies wird durch steigende Spaltmassenströme zumindest bei höheren Druckverhältnissen jedoch überkompensiert. Dabei werden die vorlaufenden Kammern mit Masse höherer Enthalpie beaufschlagt, so weiter erwärmt mit der Folge erhöhter Motoraustrittstemperaturen.

Bei niedrigen Motordrehzahlen ist diese Wirkung ebenfalls zu beobachten, weil hier für den Massenübergang in Nachbarkammern mehr Zeit zur Verfügung steht.

Die Minima der Motoraustrittstemperaturen sind dicht unterhalb des angepassten Betriebes zu erwarten, die Nachverdichtung sorgt hier bei weiter sinkendem äußeren Druckverhältnis für einen erneuten Temperaturanstieg am Motoraustritt.

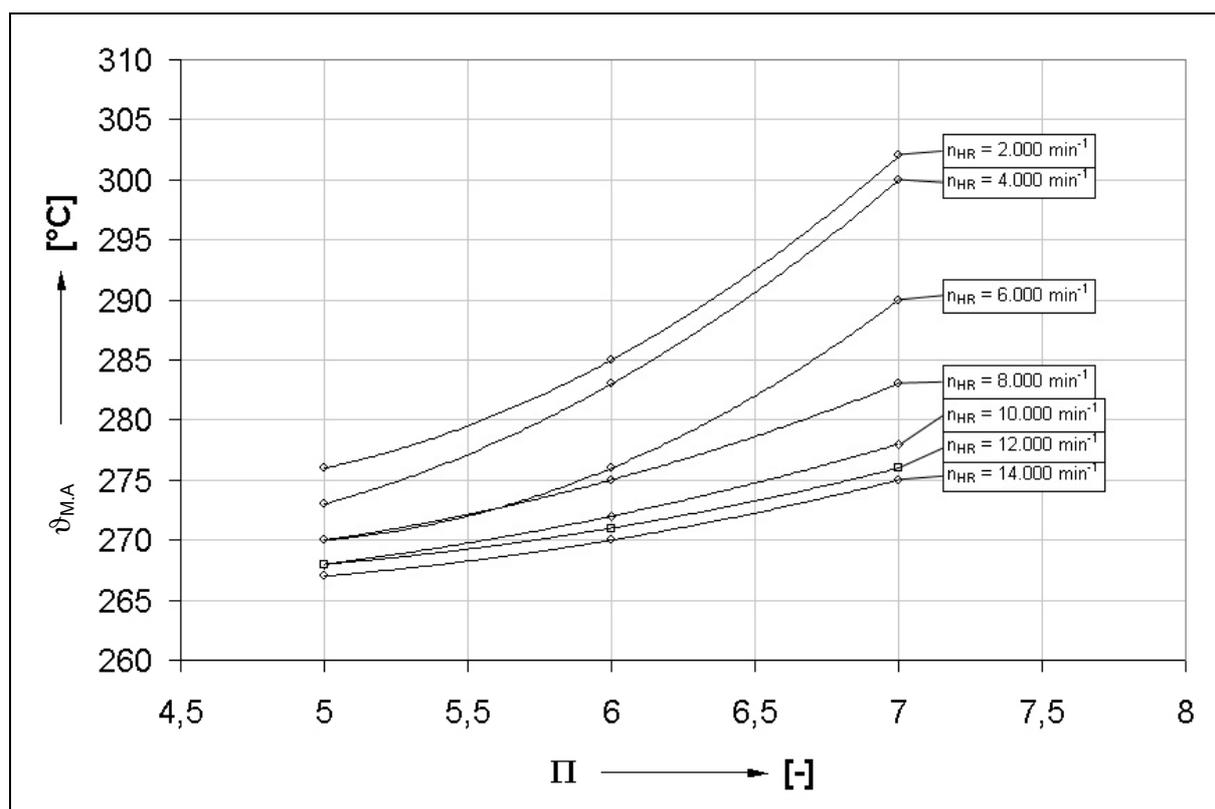


Bild 6: Gemessene Motoraustrittstemperaturen  $\vartheta_{M,A}$  als Funktion des Druckverhältnisses

Parameter: Hauptrotordrehzahl  $n_{HR}$

Konstante: Motoreintrittstemperatur  $\vartheta_{M,E} = 500 \text{ °C}$

### 3.3 Indizierung des Schraubenmotors

Die Drehzahl des Motors beeinflusst erwartungsgemäß den Expansionsverlauf.

Bei hoher Drehzahl steht eine geringere Zeit zur Kammerfüllung zur Verfügung, so dass der maximale Kammerdruck durch die Eintrittsdrosselung der Ladung mit steigender Drehzahl abfällt.

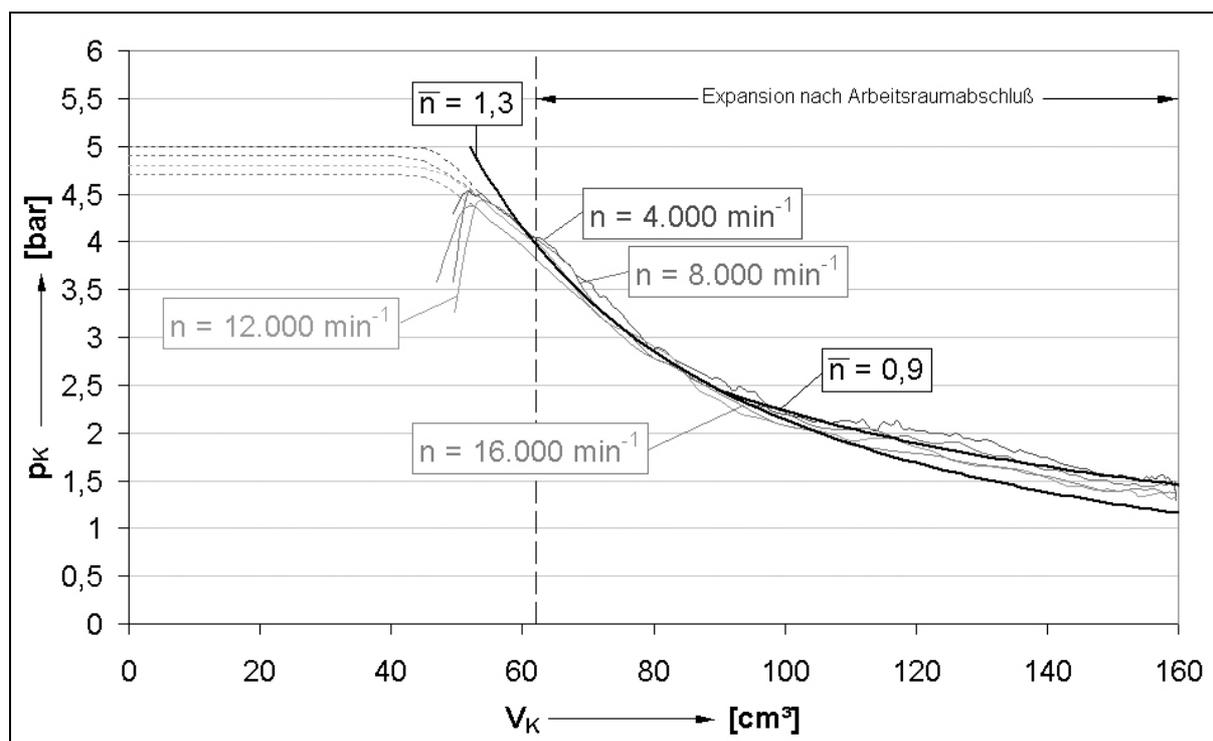


Bild 7: Indikatordiagramme des GASSCREW-Motors für verschiedene Hauptrotordrehzahlen  $n$

Konstante: Motoreintrittsdruck  $p_{M,E} = 5 \text{ bar}$ , Motoreintrittstemperatur  $\vartheta_{M,E} = 500 \text{ °C}$

Zum Vergleich zwei polytrophe Zustandsverläufe  $\bar{n} = 0,9$  und  $\bar{n} = 1,3$

Kurze Arbeitsspielzeiten reduzieren Spaltmassenströme, die zur Erwärmung der vorlaufenden Kammer beitragen könnten. Der deutlich flachere Verlauf der Expansion ab einem Kammervolumen von etwa  $V_K = 90 \text{ cm}^3$  mit einem Polytropenexponenten nahe der Isothermen zeigt eine Erwärmung des Kammerinhaltes zum einen durch warme Spaltmassenströme aus der nachlaufenden Kammer, zum anderen durch den Wärmeübergang aus dem Rotor an das Arbeitsgas. Da der Einfluss des Wärmeüberganges vom Rotor an das Gas aufgrund der auch bei relativ niedrigen Drehzahlen noch recht kurzen dafür zur Verfügung stehenden Zeit als gering angenommen wird, bleiben die Spaltmassenströme ursächlich für die Erwärmung während der Expansion. Steht dafür bei hohen Hauptrotor-

umfangsgeschwindigkeiten weniger Zeit zur Verfügung, wird der Kammerdruck, die Kammer-temperatur und somit der Enthalpieinhalt der Kammer gegenüber niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten geringer.

Beim Kammerabschluss stellt sich ein Polytropenexponent von etwa 1,3 ein, der im weiteren Verlauf der Expansion unter eins sinkt, wobei thermodynamisch hier die isotherme Expansion erreicht und zu höheren Temperaturen hin überschritten wird.

Die bekannte Problematik eines sinkenden Kammerdruckes bereits vor dem Kammerabschluss auf der Druckseite findet man für den gesamten Motoreintrittsbereich gleichermaßen, **Bild 8**. Hohe Motoreintrittsdrücke bewirken neben dem verzögerten Beginn der Expansion einen vergleichsweise steileren Druckgradienten während der Expansion.

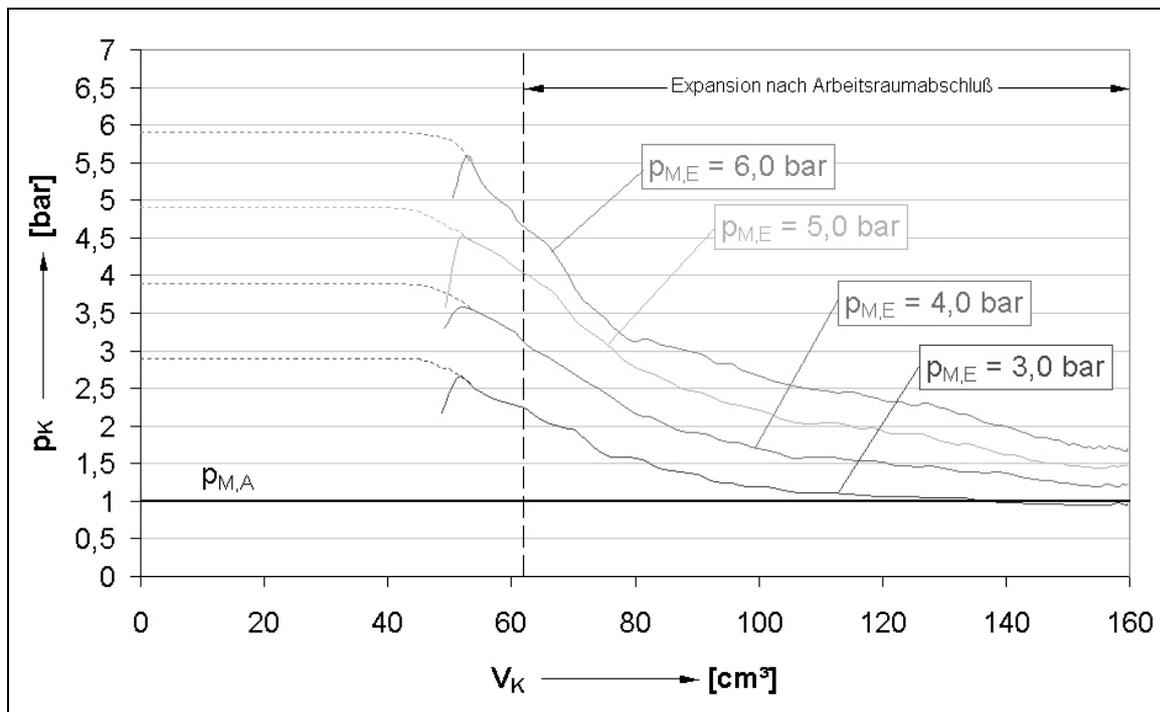


Bild 8: Indikatordiagramme des GASSCREW-Motors

Parameter: Motoreintrittsdruck  $p_{M,E}$

Konstante: Hauptrotordrehzahl  $n_{HR} = 10.000 \text{ min}^{-1}$ ,

Motoreintrittstemperatur  $\vartheta_{M,E} = 500 \text{ °C}$

## 4. Zusammenarbeit Schraubenmotor/Schraubenverdichter

### 4.1 Einfluss der Motordrehzahl

Nach der Aufnahme des Motorkennfeldes wird der Verdichter an den Antriebsstrang angeschlossen und in verschiedenen Zusammenarbeitspunkte gemessen.

Als Maß für den vollständigen Gaserzeugerbetrieb dient der Startluftanteil, geliefert von einem externen Startluftverdichter. Wird der Startluftanteil zu Null, ist der Gaserzeugerbetrieb erreicht, der GASSCREW-Verdichter liefert dann den gesamt benötigten Luftmassenstrom.

Nach der Messung des Gesamt- und des Startluftmassenstromes kann ein Startluftanteil

$$d_{SL} = \frac{\dot{m}_{Startluft}}{\dot{m}_{Motor}}$$

definiert werden, wobei der Startluftanteil von  $d_{SL} = 0\%$  gerade dem Gaserzeugerbetrieb entspricht. **Bild 9** verdeutlicht den gemessenen Verlauf des Startluftanteils als Funktion der Hauptrotordrehzahl des Motors bei einem Motoreintrittsdruck von 4 bar für verschiedene Motoreintrittstemperaturen. Die Ausbildung eines Minimums aller Kurven im Drehzahlbereich  $7.000 \text{ min}^{-1}$  bis  $9.000 \text{ min}^{-1}$  kennzeichnet die optimale Zusammenarbeit beider Maschinen der GASSCREW. Mit steigender Motoreintrittstemperatur nimmt erwartungsgemäß der Startluftanteil ab. Der Gaserzeugerbetrieb ( $d_{SL} = 0\%$ ) kann zwischen  $700^\circ\text{C}$  und  $750^\circ\text{C}$  erwartet werden.

Die optimierte Zusammenarbeit beider Schraubenmaschinen im unteren Drehzahlbereich ist in **Bild 10** zu erkennen. Hier werden für verschiedene Motordrehzahlen die minimal möglichen Getriebeübersetzungen bestimmt. Da das CVT-Getriebe vom Motor zum Verdichter die Drehzahl untersetzt, bedeutet eine Verringerung der Getriebeübersetzung bei konstanter Motordrehzahl eine Drehzahlerhöhung des Schraubenverdichters. Dann kann mehr Luft durch den ja direkt angetriebenen Verdichter komprimiert werden, d.h., der Startluftanteil nimmt ab.

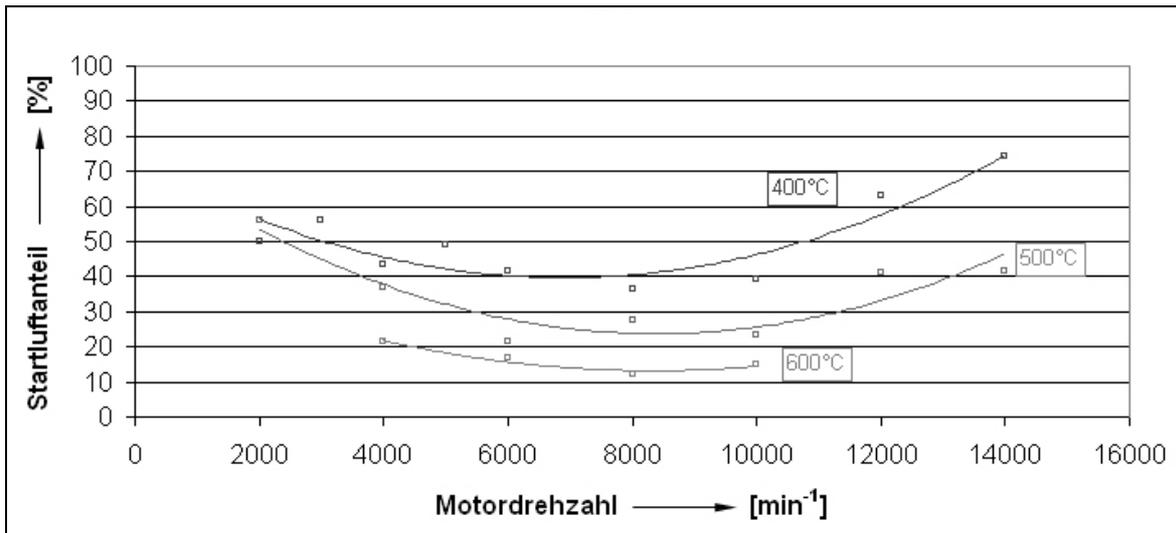


Bild 9: Startluftanteil  $d_{SL}$  als Funktion der Hauptrotordrehzahl des Schraubenmotors

Parameter: Motoreintrittstemperatur  
 Konstante: Motoreintrittsdruck 4 bar  
 Getriebeübersetzung  $i = 6,0$

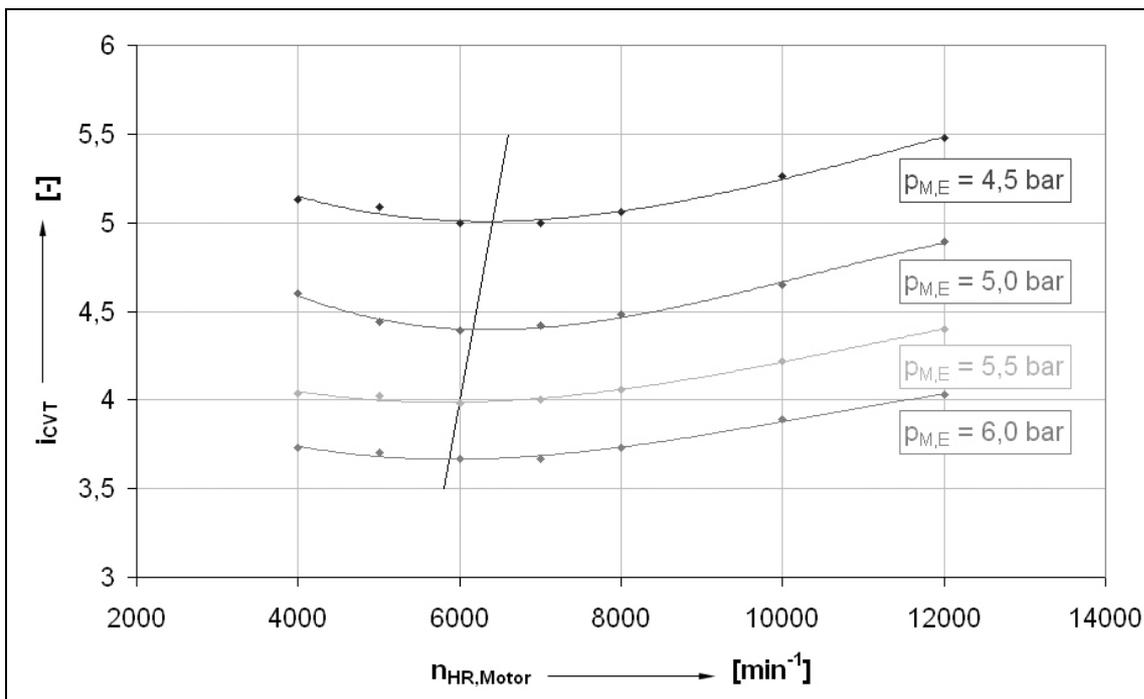


Bild 10: Grenzkurve minimaler Getriebeübersetzungen als Funktion der Hauptrotordrehzahl des Schraubenmotors

Parameter: Motoreintrittsdruck  $p_{M,E}$   
 Konstante: Motoreintrittstemperatur  $\vartheta_{M,E} = 600^\circ\text{C}$

Die dabei erforderliche Verdichterleistung steigt jetzt an, die ebenfalls ansteigende Motorleistung kompensiert diesen zusätzlichen Bedarf. Nachdem sich der im Bereich niedriger Drehzahlen negative Einfluss der Spaltmassenströme zu höheren Drehzahlen hin verringert hat, steigen jedoch die hydraulischen Verluste, **Bild 4**, in den Gleitlagern des Motors und den Arbeitsräumen des öleinspritzgekühlten Verdichters. Die minimal mögliche Getriebeübersetzung wächst, der Verdichter läuft nun langsamer, weil Motorleistung durch höhere Verluste vermindert wird und nicht mehr der Kompression des Verdichters zur Verfügung steht. Als Betriebsoptimum könnte für die untersuchte Maschinenkombination ein Motor-Hauptrotordrehzahlbereich von  $6.000 \text{ min}^{-1}$  bis  $8.000 \text{ min}^{-1}$  für Motoreintrittsdrücke zwischen 4 bar und 6 bar angegeben werden.

#### 4.2 Einfluss des Motoreintrittsdruckes

Den motoreintrittsdruckabhängigen Startluftanteil als Funktion der Motordrehzahl für verschiedene Motoreintrittstemperaturen und Motoreintrittsdrücke ist **Bild 11** zu entnehmen.

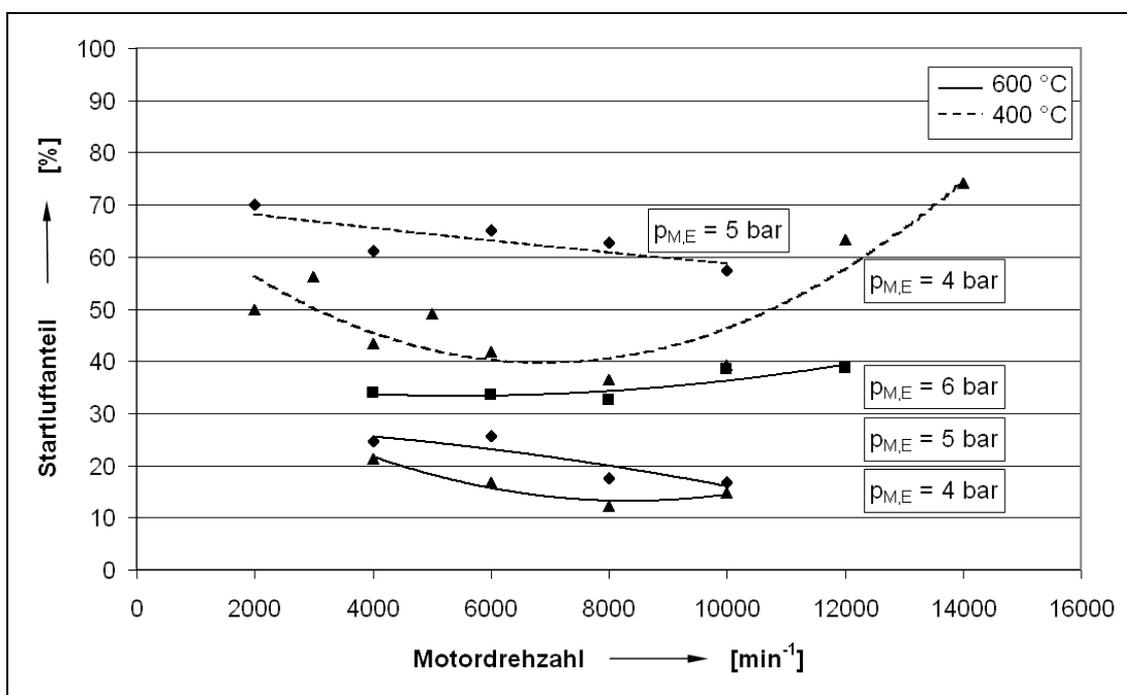


Bild 11: Motoreintrittsdruckabhängiger Startluftanteil als Funktion der Motor-Hauptrotordrehzahl

Parameter: Motoreintrittsdruck  $p_{M,E}$   
 Motoreintrittstemperatur

Wie zu **Bild 9** bereits ausgeführt, besitzt die Motoreintrittstemperatur den wesentlichen Einfluss auf den Startluftanteil. Die hohe notwendige Verdichterleistung bei hohen Motoreintrittsdrücken lässt den Startluftanteil deutlich ansteigen. Drücke kleiner 4 bar reduzieren die Leistungsdichte der Maschine durch die hier geringere spezifische Nutzarbeit jedoch weiter, so dass der Bereich zwischen 4 bar und 5 bar hier als Optimum gelten kann.

## 6. Ausblick

Der Versuchsbetrieb der GASSCREW hat gezeigt, dass dieses Antriebskonzept positive Eigenschaften besitzt und für einen Leistungsbereich zwischen 50 bis 500 kW weiter entwickelt werden kann. Zwar konnte der Gaserzeugerbetrieb nicht ganz erreicht werden, jedoch lagen die Einschränkungen nicht auf Seiten der primären Systemkomponenten sondern an den verwendeten Werkstoffen. Eine industrienahere Weiterentwicklung für den noch notwendig höheren Temperaturbereich, wird als erfolgversprechend angesehen.

### Literatur:

- [1] Dosdall, Henrik: Simulation des stationären und instationären Betriebsverhaltens der Heißgasschraubenmaschine.  
Dissertation, Universität Dortmund, VDI-Fortschrittberichte, Reihe 6, Nr. 365, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [2] von Unwerth, Thomas: Experimentelle Verifikation des Simulationssystems für eine GASSCREW. Dissertation, Universität Dortmund, 2002