

## Neue Antriebs- bzw. Regelungsvariante für stationäre Schraubenkompressoren

Ing. H. Hrabal, Ing. G. Kindl, Ing. K. Rein und Ing. G. Bach, Wien

### Zusammenfassung

Schraubenkompressoren werden mit Regeleinrichtungen ausgerüstet, um die Liefermenge an den jeweiligen Bedarf anpassen zu können.

Vom Energieverbrauch her betrachtet, arbeiten Schraubenkompressoren bei Vollast wirtschaftlich, im meist vorherrschenden Teillastbetrieb aber unwirtschaftlich. Schraubenverdichter mit Elektromotorantrieb werden daher oft als typische Grundlastmaschinen bezeichnet und auch als solche eingesetzt.

Durch den beschriebenen Anlaufautomaten können Schraubenkompressoren mit Elektromotorantrieb auch bei geringem Bedarf, also auch als Spitzenlastmaschine, in der wirtschaftlichsten Betriebsart – „Vollast oder Stillstand“ – gefahren werden: Der Motor läuft völlig lastfrei an. Der Kompressor wird erst zugeschaltet, wenn der Motor Nenndrehzahl und Nennmoment erreicht hat.

### Summary

Screw compressors are usually fitted with regulation equipment to match the compressor's capacity to the current demand.

In terms of energy consumption, screw compressors work economically at full load but less economically in the partial load conditions which often prevail. Therefore screw compressors driven by electric motor are often identified as typical base load compressors and are often used accordingly.

With the automatic clutch, however, screw compressors driven by electric motor can be run in start-stop mode with the economy of a base load compressor, regardless of the degree of load. The electric motor starts completely unloaded and the compressor is only connected when the motor has reached its nominal speed and torque.

## REGELUNG der LIEFERMENGE von SCHRAUBENKOMPRESSOREN REGELUNGSKONZEPTE

Zur Regelung eines Schraubenkompressors werden verwendet:

REGELUNGSKONZEPT	ERREICHT DURCH (Diagramm)	HAUPTANWENDUNG
Anlage stillsetzen	Motor ausschalten (1)	Kleinkompressoren
Ansaugung drosseln	Stufenlose Ansaugregler (2) oder Leerlaufregler.	Luftverdichter aller Baugrößen
Geringere Menge verdichten	Antriebsdrehzahl ändern (3) variables Volumenverhältnis (4)	Fahranlagen Kältemaschinen
Verdichtete Menge abblasen	Bypaß (5) bzw. Abblaseventil	Gaskompressoren
Enddruck absenken	Enddruck während des Leerlaufes auf ca. Ansaugdruck gesenkt	
Mehrere Kompressoren	Stufenweise Regelung durch Zuschalten bzw. Wegschalten	Kompressor- stationen

## KOMBINATIONEN VON REGELUNGSKONZEPTEN

Regelungssysteme stellen immer einen Kompromiß zwischen Anschaffungskosten, Regelungskomfort und Wirtschaftlichkeit im Betrieb dar. Bei ölüberfluteten Schraubenkompressoren für Luft werden oft die Vorteile mehrerer Regelungskonzepte kombiniert – Kleinkompressoren ausgenommen.

KOMBINATION (Beispiele)	HAUPTANWENDUNG
Stufenlose Ansaugdrosselung und stufenlose Drehzahlregelung (6)	Fahranlagen, Antrieb durch Dieselmotor
Last/Leerlaufregelung, Ölabscheiderdruck während des Leerlaufes abgesenkt (7), mit Abstellen des Kompressors über Zeitrelais (8), oder mikroprozessorgesteuertes Abstellen (9)	Stationäre Anlagen, Elektromotorantrieb Elektromotorantrieb
Variables Volumenverhältnis, Abstellen des Kompressors bei geringem Luftbedarf	Bei Luftkompressoren selten angewandt
Stufenlose Drehzahlregelung des Elektromotors, Abstellen bei geringem Luftbedarf	
100%/50% durch polumschaltbaren Elektromotor, Leerlaufregelung, Abstellen bei geringem Bedarf	Bei Luftkompressoren selten angewandt

## KOMPRESSORREGELUNG UND ENERGIEKOSTEN

Sinn einer Liefermengenregelung ist die wirtschaftliche Anpassung der verdichteten Menge an den jeweiligen Bedarf. Die Energieersparnis im Teillastbereich ist bei den Verfahren zur Regelung von Schraubenverdichtern sehr unterschiedlich:

Durch Abblasen bzw. Bypaßregelung (5) kann keine Energie eingespart werden. Bei stufenlosen Ansaugdrosselregelungen (2) ist die Energieersparnis relativ gering. Sie werden daher zumeist dann eingesetzt, wenn der Kompressor in ein sehr kleines

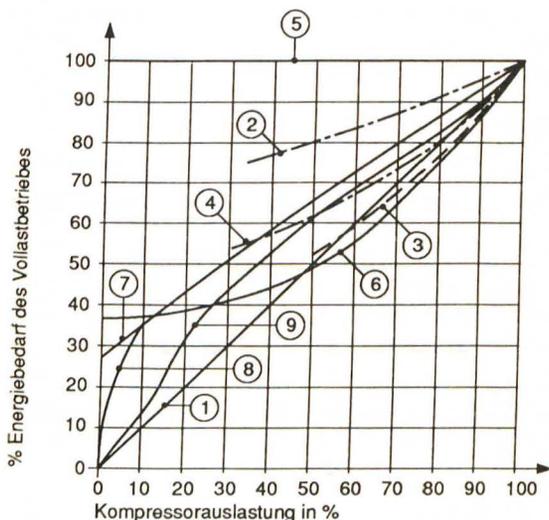


Diagramm 1

Bei einer Start-Stopp-Regelung (1) die über den gesamten Teillastbereich einsetzbar ist, wird die wenigste Energie verbraucht. Da sie wegen der pro Stunde zulässigen Anzahl der Motorstarts oft nicht im gesamten Auslastungsbereich anwendbar ist, werden Kombinationen (8, 9) mit anderen Regelungsverfahren eingesetzt.

## REGELUNG VON SCHRAUBENKOMPRESSOREN MIT ELEKTROMOTORANTRIEB

In diesem Beitrag werden Verfahren zur Liefermengenregelung von ölüberfluteten Schraubenkompressoren für Luft mit Antrieb durch einen Drehstrom-Asynchronmotor beschrieben. Dabei wird auf die Regelung durch Drosseln der Ansaugung und durch Stillsetzen näher eingegangen. Vorteile und Grenzen der Regelung der Drehzahl des Elektromotors oder des Volumenverhältnisses  $V_i$  werden in anderen Beiträgen zur Tagung behandelt.

### KONVENTIONELLER START-STOPP-Betrieb („Stillsetzregelung“):

Vom Energieverbrauch her ist dies die wirtschaftlichste Form der Liefermengenregelung bei Schraubenverdichtern, die in ein Druckluftnetz fördern. Der Kompressor wird eingeschaltet, wenn der Mindestdruck im Druckluftnetz unterschritten wird. Er wird abgeschaltet, wenn der Höchstdruck im Druckluftnetz erreicht ist. Energie wird verbraucht für:

- den Motorstart bis zum Schließen des Entlüftungsventils
- das Auffüllen des Ölabscheiders auf Netzdruck
- Das Verdichten auf Netzdruck im Vollastbetrieb
- das Aufpumpen des Verbrauchernetzes bis zum höchsten Netzdruck, bei dem der Kompressor abgestellt wird

Volumen fördert – etwa bei Fahranlagen (6) – oder in Kombination mit anderen Regelverfahren. Wird der Druck im Ölabscheider während des Leerlaufes abgesenkt, so verbessert sich die Wirtschaftlichkeit der Ansaugdrosselregelung (7). Regelungen durch Änderung der Drehzahl (3, für Dieselmotor) oder durch ein variables Volumenverhältnis  $V_i$  (4, für Luft) weisen gute Energieersparniswerte auf. Sie sind aber nur in Verbindung mit anderen Regelungsverfahren im gesamten Auslastungsbereich einsetzbar.

Da die Startanzahl pro Stunde von den Elektromotorerzeugern beschränkt wird, ist diese Art der Regelung für den gesamten Liefermengenbereich – 0 bis 100% – nur unter folgenden Voraussetzungen zu verwirklichen:

- Das Verbrauchernetz ist – gegenüber der Liefermenge – sehr groß.
- Zusätzliche, große Druckluftspeicher werden installiert.
- Mehrere kleinere Kompressoren sind verfügbar bzw. werden statt wenigen leistungsstarken Einheiten beschafft. Sie werden durch eine Anlagensteuerung je nach Bedarf zu- oder abgeschaltet.
- Große Druckdifferenzen zwischen Einschalten und Ausschalten und damit erhebliche Netzdruckschwankungen werden in Kauf genommen.
- Große Druckschwankungen werden durch Verdichten auf einen erhöhten Netzdruck und nachfolgende stärkere Druckreduzierung ausgeglichen.

Wenn auch durch diese Maßnahmen erreicht werden kann, daß der Kompressor selbst energiesparend betrieben wird, so sind doch Investitionskosten und Platzbedarf sowie die Minderung der Wirtschaftlichkeit durch Betrieb mit überhöhtem Druck und starken Netzdruckschwankungen zu bedenken.

Oft ist ein Start-Stopp-Betrieb über den gesamten Liefermengenbereich nicht zweckmäßig. Die angesaugte bzw. verdichtete Luftmenge muß bei laufendem Kompressor geregelt werden. Tatsächlich sind ja fast alle Schraubenkompressoren ab einer bestimmten Leistung mit einer solchen Regeleinrichtung ausgerüstet.

## KONVENTIONELLER VERZÖGERTER STILLSETZBETRIEB

Zumeist ist eine Leerlaufregelung mit einer Einrichtung zum Absenken des Druckes im Ölabscheider und mit Einrichtungen kombiniert, durch die der Kompressor je nach Luftbedarf sofort oder nach einer gewissen Zeit stillgesetzt werden kann. Betrieb und Energieverbrauch eines mit einer solchen Regelung betriebenen Kompressors wird im Diagramm (2) veranschaulicht:

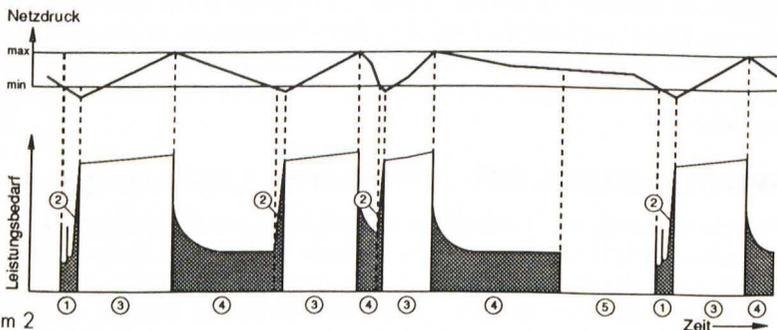


Diagramm 2

Feld 1 zeigt den Energieverbrauch beim Start, Feld 2 den Energiebedarf für das Auffüllen des Ölabscheiders, Feld 3 die beim Vollastbetrieb, und Feld 4 die während des Leerlaufes vom Motor aufgenommene Energie.

Man erkennt, wieviel Energie im Leerlauf verschwendet wird, auch bei kurzen aber häufigen Leerlaufperioden. Die heute üblichen Regelungen mit Zeitrelais oder Mikroprozessorsteuerung können zwar den Energieverbrauch senken - die Anzahl der

Abstellvorgänge, auch die der Sofortstopps bei einer mikroprozessorgesteuerten Regelung ist aber in jedem Fall durch die zulässige Anzahl der Starts des Elektromotors begrenzt. Auch ist die Wirksamkeit dieser Stillsetzeinrichtungen vom Anwendungsfall abhängig und damit sehr unterschiedlich. Unrichtige Justierung bzw. Programmierung oder Änderungen im Luftbedarfsprofil können die Wirksamkeit dieser Regelungen und damit die Wirtschaftlichkeit des Kompressorbetriebes stark beeinträchtigen.

### START-STOPP-BETRIEB mit einem ANLAUFAUTOMATEN

Bei dieser hier vorgestellten Regelungsart wird Energie nur für das Verdichten der Luft (Vollastbetrieb, Feld 3) und für Startvorgänge (Direktstart oder Stern-Dreieck-Start, Feld 6) benötigt. Es gibt nur einen Auffüllvorgang zu Betriebsbeginn (Feld 1), da gegen den vollen Druck im Ölabscheider gestartet werden kann.

Dies ist möglich, weil der Motor völlig unbelastet angefahren wird. Kurzschlußläufermotoren, die völlig unbelastet anlaufen, erwärmen sich beim Start sehr wenig. Sie können daher wesentlich öfter gestartet werden, als Motoren, die mit dem Lastmoment bzw. Massenträgheitsmoment des Kompressors belastet sind. Nenndrehzahl und Nennmoment werden schnell erreicht.

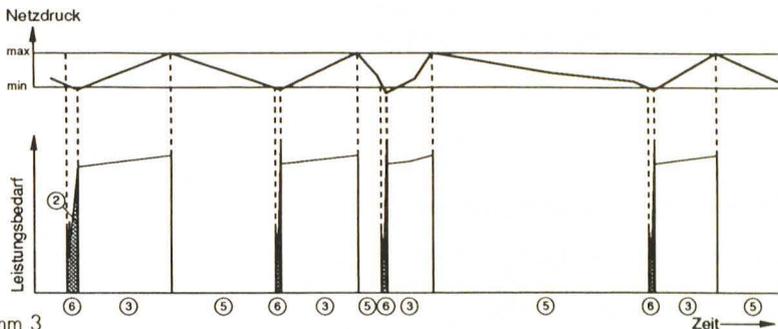


Diagramm 3

Diese Eigenschaft der Regelung mit Anlaufautomat gestattet es, den Schraubenkompressor über den gesamten Liefermengenbereich so energiesparend zu betreiben wie eine Grundlastmaschine:

- Es wird ausschließlich Vollast gefahren.
- Es muß keine Druckluft mehr abgelassen werden, um starten zu können.
- Es sind weder große Druckluftbehälter notwendig, noch müssen große Druckschwankungen im Verbrauchernetz in Kauf genommen werden.
- Die Anzahl der Kompressoren in einer Druckluftstation kann ohne aufwendige Verbundsteuerungen - ausschließlich von den Sicherheitserfordernissen der Druckluftversorgung her festgelegt werden.
- Starke Bedarfschwankungen bei Schichtbetrieb oder Umstellungen in der Produktion haben keinen meßbaren Einfluß auf die hohe Wirtschaftlichkeit eines Schraubenkompressors, der mit einem Anlaufautomaten ausgerüstet ist.

Die Bedeutung dieser Vorteile kann der mit den Kosten für *Installation* und *Betrieb* von Schraubenkompressoren vertraute Praktiker am besten ermessen – schließlich können allein die Energiekosten bereits im ersten Jahr höher sein, als die Anschaffungskosten des neuen Kompressors.

## AUFBAU des ANLAUFAUTOMATEN

Für die Beschreibung des Aufbaues und der Wirkungsweise wurde die rechts abgebildete Ausführung für einen riemengetriebenen Schraubenkompressor, Leistungsbereich 15 bis 22 kW, Antrieb durch einen zweipoligen Kurzschlußläufermotor mit Betriebsdrehzahl ca. 2900 U/min, gewählt. Es ist ein Anlaufautomat mit einer Reibfläche. Für größere Leistungen sind mehrere Lamellen bzw. Reibflächen notwendig. Für einen Antrieb von Welle zu Welle gibt es eine eigene Bauweise.

Der Anlaufautomat wird so wie eine Riemenscheibe durch Paßfeder und Schraube im Zentrum der Motorwelle befestigt. Die Innenlamelle (6), auf der ein asbestfreier organischer Reibbelag aufgeklebt ist, ist auf der Verzahnung der Hohlwelle (1) axial verschiebbar. Der Abtriebsteil des Automaten (8) mit der Riemenscheibe ist auf der Hohlwelle kugellagert. Seine Vorderseite ist als Gegenfläche zum Reibbelag der Innenlamelle ausgebildet.

An der Stirnseite der Hohlwelle ist die Schaltkammer des Anlaufautomaten befestigt. Auf der Kammerwelle (2), auf der auch der Ventilator befestigt werden kann, ist das Gehäuse (7) der Schaltkammer kugellagert. Es ist – wie der Abtriebsteil – freidrehbar. Die Fliehgewichte (4) und der auf Kugeln geführte Druckring (3) sind auf das Kammergehäuse aufgeschoben. Zugfedern (5) und Führungbolzen halten die Teile in der gezeichneten Stellung.

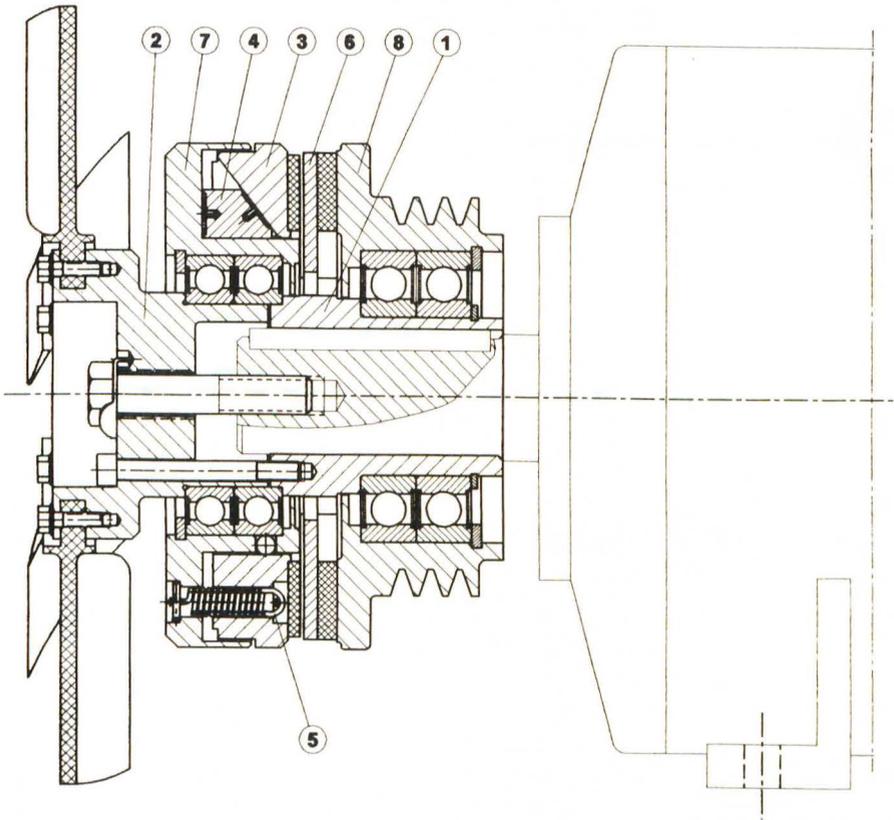
## FUNKTION des ANLAUFAUTOMATEN

Der Elektromotor wird – über Stern-Dreieck oder direkt in Dreieck – eingeschaltet. Er kommt sehr rasch auf Drehzahl, da er nur sich selbst und eine geringe zusätzliche Masse beschleunigen muß, die aus Hohlwelle, Innenlamelle, Kammerwelle, den Innenringen der Kugellager und den Ventilatorflügeln besteht. Der Abtriebsteil wird durch Lastmoment bzw. Massenträgheitsmoment von Schraubenstufe und Riemenscheiben am Mitdrehen gehindert.

Die kugellagerte Schaltkammer beginnt durch ihr Beharrungsvermögen verzögert zu drehen. Bei etwa 1000 U/min, der Aktivierungsdrehzahl der Schaltkammer, wird die Kraft der Rückzugfedern (5) überwunden und die Fliehgewichte (4) beginnen nach außen zu wandern. Ihre keilförmigen Flächen bewirken, daß sich der Druckring (3) in Richtung der Innenlamelle (6) verschiebt, und die Innenlamelle mit dem Reibbelag an die Gegenreibfläche des Abtriebsteiles drückt. Die Schaltkammer, die bis zu diesem Zeitpunkt nur durch die Reibung in den Kugellagern beschleunigt wurde, erreicht nun innerhalb weniger Umdrehungen die volle Motordrehzahl.

Durch die Zunahme der Drehzahl auf ca. 2900 U/min erhöht sich die Fliehkraft. Alle vorgenannten Teile werden mit großer Kraft gegeneinander gedrückt. Nach einer kurzen Beschleunigungszeit erreicht auch der Abtriebsteil die volle Betriebsdrehzahl.

Im eingekuppelten Zustand dreht sich der gesamte Anlaufautomat mit Betriebsdrehzahl. Es gibt keine Relativbewegungen zwischen den Einzelteilen, d.h. auch keinen Schlupf.

**Anlaufautomat CMR20110**

Wird der Elektromotor abgestellt, so bremst das Lastmoment der Schraubenstufe den Abtriebsteil rasch ab. Sobald die Aktivierungsdrehzahl (1000 U/min) unterschritten wird, ziehen die Rückzugfedern die Schaltkammer in die Ausgangsstellung zurück und der Motor läuft unbelastet aus. Der Anlaufautomat ist bereit zum nächsten Anlauf.

## START DES ELEKTROMOTORS

Die drei beschriebenen Startvorgänge zeigen die Stromaufnahme in Ampere während des Startvorganges in Sekunden. Sie wurden alle am gleichen Schraubenkompressor mit einem Transientenrecorder gemessen. Die Umgebungsbedingungen waren identisch. Die Bildausgabe erfolgte über einen Matrixdrucker.

### Konventioneller Stern-Dreieckstart (Ohne Anlaufautomat)

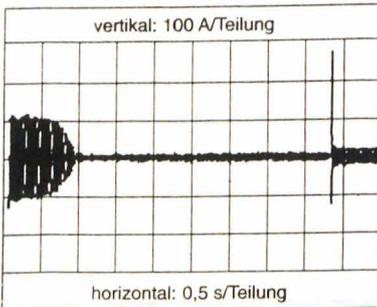


Bild S1

Bild S1 zeigt den Start der Kompressoranlage bei entlüftetem Ölabscheider und offenem Entlüftungsventil bzw. Leerlaufbypassventil. Man sieht die Stromspitzen beim Einschalten des Motors sowie beim Umschalten auf Dreieck. Die Aufzeichnung endet beim Beginn des Auffüllvorganges des entlüfteten Ölabscheiders.

### Stern-Dreieckstart mit Anlaufautomat

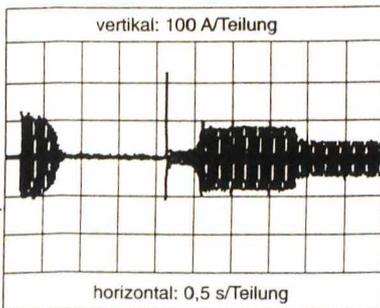


Bild S2

Bild S2 zeigt den Start gegen 7 bar Überdruck im Ölabscheider. Höhe und Breite der Spitzen beim Einschalten und Umschalten auf Dreieck sind durch das völlig unbelastete Anfahren des Motors geringer als beim konventionellen Stern-Dreieck-Start. Nach ca. 3 Sekunden spricht der Anlaufautomat an. Nach 4 Sekunden wird bereits Luft ins Druckluftnetz gefördert (Stromaufnahme bei Vollast).

### Direktstart mit Anlaufautomat

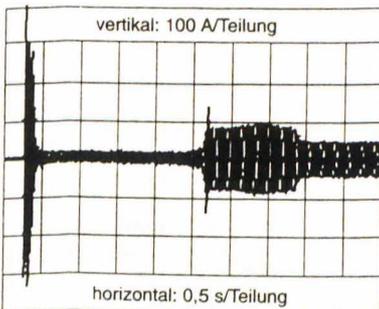


Bild S3

Der völlig unbelastete Motor kann – wie im Bild S3 gezeigt – direkt in Dreieckschaltung angefahren werden, wenn eine entsprechende Stromversorgung, z.B. ein Werkstransformator vorhanden ist. Der Energieverbrauch ist hier etwas geringer als beim Stern-Dreieck-Start, auch könnte bereits etwa 5 sek nach dem Abstellen des Motors wieder gestartet werden.

## ANSPRECHEN DES ANLAUFAUTOMATEN:

Der Stromverlauf zeigt an der linken Seite der letzten Stromspitze deutlich das Ansprechen der Schaltteile, in der Mitte die Stromaufnahme beim Beschleunigen der Schraubenstufe auf Betriebsdrehzahl und rechts davon die Stromaufnahme bei Vollastbetrieb gegen den vollen Enddruck.

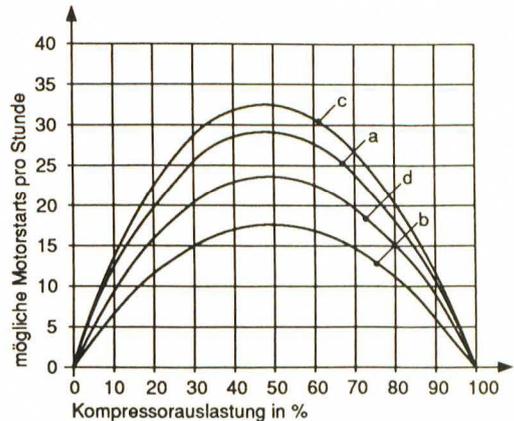
Die beim Beschleunigen der Schraubenstufe an den Reibflächen kurzzeitig auftretende Wärme wird sofort ins Innere der anliegenden Metallteile des Anlaufautomaten abgeleitet. Die mittlere Betriebstemperatur dieser Teile entspricht etwa der Betriebstemperatur des Elektromotors. Daher benötigen sie ebenso wie dieser eine Kühlung durch einen Ventilator.

Wie der Elektromotor, kann auch der Anlaufautomat zweimal unmittelbar nacheinander gestartet werden. Die Intervalle weiterer Starts hängen dann von mehreren Faktoren ab, die nachfolgend kurz beschrieben werden:

### 1. Mögliche Startanzahl pro Stunde in Abhängigkeit vom Verbrauchernetz

Die Liefermenge des Kompressors, die Einstellung des Druckschalters und das Volumen des Verbrauchernetzes bestimmen Einschalt- und Ausschaltdauer des Motors und damit die Anzahl der beim gegebenen Anwendungsfall innerhalb einer Stunde möglichen Starts.

Das Diagramm zeigt die Anzahl der möglichen Starts in Abhängigkeit der jeweiligen Auslastung am Beispiel eines 37kW-Schraubenkompressors mit Liefermenge 5,7 m<sup>3</sup>/min, Enddruck 7 bar Überdruck. Die größte Startanzahl pro Stunde wird bei knapp 50% Auslastung des Kompressors erreicht.



Kurve	Verbrauchernetz	Druckschaltereinstellung
a	4 m <sup>3</sup>	7 + 8 bar
b	7 m <sup>3</sup>	7 + 8 bar
c	7 m <sup>3</sup>	7 + 7,5 bar
d	10 m <sup>3</sup>	7 + 7,5 bar

### 2. Einfluß der Start- und Auslaufzeit auf die möglichen Startintervalle:

Die Zeit, in der keine Druckluft erzeugt wird, enthält auch die Zeitspannen für das Ansprechen des Anlaufautomaten, das ist das kraftschlüssige Verbinden von Motor- und Schraubenkompressorwelle sowie das Auslaufen. Die „Ansprechzeit“ des Anlaufautomaten liegt bei 3 bis 5 sek, ist gut reproduzierbar und erhöht sich erst nach langem Einsatz um einige Sekunden. Die „Auslaufzeit“ des Automaten bis zum Trennen von Motor- und Kompressorwelle beträgt bei Riementrieb nur wenige Sekunden, bei Antrieb Welle zu Welle einige Sekunden mehr.

Wird allerdings bei noch auslaufendem Motor neuerlich gestartet, so verkürzt sich die Ansprechzeit des Automaten beim nächsten Start. Deshalb ist bei Stern-Dreieck-Start eine zusätzliche Motorauslaufzeit zu berücksichtigen, da der Anlaufautomat den Kompressor erst zuschalten darf, nachdem der Motor auf Dreieck geschaltet wurde.

### 3. Vom übertragenen Moment her mögliche Startanzahl pro Stunde.

Beim Start müssen nicht nur der Abtriebsteil des Anlaufautomaten, sondern auch die Schraubenstufe, das Getriebe bzw. die Riemenscheiben beschleunigt werden. Je größer das Massenträgheitsmoment der genannten Teile ist, desto größer ist auch die Beschleunigungsarbeit. Im eingekuppelten Zustand ist nur das Lastmoment der Schraubenstufe zu übertragen.

Bei Kompressoren gleicher Leistung aber unterschiedlichen Massenträgheitsmomenten werden die Reibbeläge unterschiedlich stark beansprucht. Daraus ergeben sich unterschiedliche zulässige Schalthäufigkeiten.

### 4. Einfluß der Temperatur

Die Betriebstemperatur des Anlaufautomaten resultiert aus dem Gleichgewicht zwischen zugeführter und abgeführter Energie durch:

- die Reibungsenergie, die beim Ansprechen des Automaten eine Temperaturerhöhung an den Reibflächen bewirkt
- externe Quellen: Strahlung (Schraubenstufe, Ölabscheider,...), Wärmezufuhr über die Wellenenden (Elektromotor, Schraubenstufe)
- die Wirksamkeit des Kühlluftstromes (Ventilator)

Tests zeigten, daß Ansauglufttemperaturen bis 40°C geringen Einfluß auf die Betriebstemperatur des Anlaufautomaten haben. Eine schlechte Wärmeabfuhr hat hingegen einen wesentlich größeren Einfluß. Sie kann die Spanne zwischen Betriebstemperatur und der für die Reibbeläge zulässigen Temperatur stark verringern. Vor allem bei Antrieb Welle zu Welle ist besonders auf ausreichende Lüftungsöffnungen in der Laterne zwischen Kompressor und Motor zu achten, sonst muß die zulässige Schalthäufigkeit reduziert werden.

### 5. Von der für den Elektromotor zulässigen Startanzahl

Bei vollkommen lastfreiem Anlauf liegt die innerhalb einer Stunde zulässige Startanzahl wesentlich höher als beim konventionellen Stern-Dreieck-Start: Angaben und Berechnungen der Motorhersteller sind zwar unterschiedlich, gehen aber alle von der Erwärmung aus, die in der Wicklung beim Start des Motors auftritt. Sind die Motordaten verfügbar, so lassen sich die zulässigen Motorstarts pro Stunde relativ leicht ausreichend genau ermitteln.

Aus dieser Aufzählung der für die Schaltanzahl bestimmenden Faktoren läßt sich unschwer ersehen, daß sich auch bei gleicher Kompressorgröße durchaus unterschiedliche zulässige Startintervalle ergeben können.

Die Richtwerte:

- Leistungen bis 11 kW: 60 Starts/Stunde
- Leistungen bis 18 kW: 45 Starts/Stunde
- Leistungen bis 37 kW: 30 Starts/Stunde

können – wie Tests zeigten – unter gegebenen Voraussetzungen auch erheblich überschritten werden. Eine genaue Kenntnis des auszurüstenden Schraubenkompressor Typs ist eine Voraussetzung für die richtige Auslegung des Anlaufautomaten. Ein Relais zur Begrenzung der möglichen Starts pro Stunde ist ratsam, da durch manuelle Eingriffe oder Defekte in der Elektrik bzw. bei der Stromversorgung etliche Starts in Abständen von wenigen Sekunden ausgelöst werden können.

## KOMPRESSORBETRIEB MIT DEM ANLAUFAUTOMATEN

Die Unterschiede zum konventionellen Start-Stopp-Betrieb sind für den Betrachter eher unauffällig. Der Motor wird im Teillastbereich zwischen 25% und 75% Auslastung wesentlich öfter gestartet. Es gibt keine Entlüftungs- und Abblasegeräusche und keine Öl/Wasserdampfsuren in der Umgebungsluft. Die Verzögerung zwischen dem Einschalten des Motors und der Verfügbarkeit der Druckluft ist um einige Sekunden kürzer.

Gegenüber dem verzögerten Stillsetzbetrieb in allen Varianten ergibt sich durch den Wegfall der Leerlaufzeiten eine nicht unwesentliche Verkürzung der Laufzeit des Kompressors. Nachdem Inspektion und Wartung von der Laufzeit des Kompressors abhängen, verlängern sich die Intervalle für diese Arbeiten.

## AUSWIRKUNGEN AUF ANDERE BAUTEILE EINER KOMPRESSORANLAGE

Hier liegen mehrjährige Erfahrungen mit öüberfluteten Schraubenkompressoren vor. Während zahlreicher Dauertests wurden auch die Auswirkungen auf die gesamte Kompressoranlage beobachtet.

### Testbericht - Übersicht

Nennleistung kW	Enddruck in bar Überdruck	Kraft- Über- tragung	Elektromotor		Starts per Stunde bei Betrieb mit Anlaufautomat	
			eingeschaltet <sup>1)</sup>	Starts, gesamt	Testbereich	vorwiegend
11	7 - 10	Riemen	7.500 h	700.000	40 bis 100	60 bis 80
18,5	7 - 10	Riemen	12.500 h	750.000	20 bis 80	45 bis 60
45	7 - 10	Getriebe	15.000 h	950.000	20 bis 60	30 bis 45
55	7 - 10	Riemen	1.800 h	110.000	20 bis 40	37

<sup>1)</sup> Zumeist wurden Schaltzyklen im Teillastbereich zwischen 25% und 75% Auslastung gefahren. Bei Durchlaufbetrieb hätte sich etwa die doppelte Motoreinschaltzeit ergeben.

Auswirkungen der vielen Starts gegen den Enddruck auf die Bauteile des Motors, der Schraubenstufe, der Kraftübertragung sowie des Ölkreislaufes waren nicht erkennbar.

## AUSWIRKUNGEN AUF DIE BAUWEISE EINER STATIONÄREN SCHRAUBENKOMPRESSORANLAGE

Bei Start-Stopp-Regelung gegen den Enddruck im Ölabscheider entfallen verschiedene Bauteile der sogenannten Kompressorperipherie, bzw. sie werden durch andere, eher einfachere Bauteile ersetzt.

### *Pneumatische Geräte:*

Da für diese Art der Regelung kein Leerlauf und kein Entlüften notwendig ist, fallen die dafür nötigen Geräte und Leitungen weg. Übrig bleibt bei druckdichten Schraubenstufen nur das Rückschlagventil in der Ansaugleitung und das Mindestdruckventil. Für Servicearbeiten ist ein kleines Ventil zum Entlüften des Ölabscheiders erforderlich.

### *Elektrik/Elektronik:*

Für die Regelung an sich ist kein Stern-Dreieckschütz erforderlich. Beim Direktstart des Motors in Dreieckschaltung ist nicht nur die Wiederanlaufzeit kürzer, auch der Energiebedarf ist um einige kW/Start geringer. Wird wegen bestehender Vorschriften oder der Stromversorgung ein Stern-Dreieckschütz verwendet, dann ist die Sternperiode auf 2 sek einzustellen. Die Überwachung der pro Stunde für Motor und Anlaufautomaten zulässigen Starts ist auf die höheren zulässigen Werte einzustellen - z. B. 80 sek für 45 zulässige Starts pro Stunde.

Änderungen oder Vereinfachungen bei der elektrischen bzw. elektronischen Regelung und Überwachung hängen von der bestehenden Ausrüstung des Kompressors ab. Zur Regelung des Druckes im Verbrauchernetz ist jedenfalls nur ein Druckschalter notwendig. Zeitrelais oder mikroprozessorgesteuerte Leistungsregelungen entfallen.

### *Ölkreislauf*

Der Wegfall der beiden Betriebszustände: Leerlauf bei abgesenktem Druck im Ölabscheider und Entlüften beim Abstellen ist sowohl für die Umweltfreundlichkeit als auch für Auswahl und Betrieb verschiedener Bauteile vorteilhaft - z. B.:

- Der Ansaugfilter wird nur in Saugrichtung durchströmt, das Zurückströmen beim Entlüften entfällt.
- Die Abscheidung des Öls erfolgt immer bei Betriebsdruck, das rasche Durchströmen beim Entlüften entfällt.
- Es gibt kein Unterfahren des Taupunktes im Leerlaufbetrieb.
- Der häufige Belastungswechsel Vakuum/Überdruck für die Wellenabdichtung beim Start entfällt.

### *Kompressorgehäuse, Rahmen, Platzbedarf*

Der Anlaufautomat erleichtert den einfachen Aufbau der Anlage, da verschiedene andere Bauteile entfallen können. Die Baulänge ist allerdings etwas größer als die Länge einer einfachen Riemenscheibe bzw. elastischen Kupplung.

## KOMPRESSORRAUM UND DRUCKLUFTNETZ

Erfahrungen, die über einen Testbetrieb hinausgehen, liegen zur Zeit noch nicht vor. Es darf jedoch erwartet werden, daß ein energiesparendes Regelungssystem, bei dem weniger bzw. kleinere Druckluftbehälter erforderlich sind als bisher, bei dem eine Verbundsteuerung mehrere Kompressoren nur zur Absicherung der Versorgung bei Ausfall eines Kompressors dient, mit dem der Druck im Verbrauchernetz sowohl durch geringe Schaltspannen als auch durch erleichterte Aufstellung vor Ort in engen Grenzen konstant gehalten werden kann, sich günstig auf Gestaltung und Betrieb eines Werkluftnetzes auswirkt.

## AUSLEGUNG DES ANLAUFAUTOMATEN

Bekannterweise unterscheiden sich Kenngrößen von Schraubenkompressoranlagen auch innerhalb einer Leistungsklasse oft erheblich voneinander. Dies gilt auch für jene Daten, die für eine Auslegung des Anlaufautomaten benötigt werden; es sind dies:

*Kompressoranlage:* Ansaugmenge, Enddruck, Kraftübertragung Welle zu Welle oder Riementrieb, verfügbarer Einbauraum, Anordnung bzw. Befestigung von Bauteilen – z. B. Ventilator – am Anlaufautomaten

*Elektromotor:* Nennleistung, Nenndrehzahl, Nenndrehmoment, Wellenabmessungen gegebenenfalls z. B. für Energieersparnisrechnung auch: Schutzart, Isolationsklasse, Wirkungsgrad, Strom- und Momentenverhältnisse beim Anlauf

*Schraubenstufe* – mit bzw. ohne Getriebe: Leistungsbedarf, Vollastdrehzahl, maximales Lastmoment bei Vollast, Massenträgheitsmoment bei Motor-Nenndrehzahl, Abmessungen der Antriebswelle

*Kraftübertragung:* Dimensionen und Massenträgheitsmomente aller Komponenten

Aus der Zusammenstellung der Daten ist leicht zu erkennen, daß für jeden *Kompressortyp* eine Auslegungs- bzw. Kontrollrechnung durchzuführen ist.

Die Rechnung geht vom Motordrehmoment, dem Lastmoment der Schraubenstufe, den Massenträgheitsmomenten der drehenden Teile und vorhandenen Kennwerten des Anlaufautomaten aus. Überprüft werden:

- das Verhältnis Schaltmoment des Anlaufautomaten zu Lastmoment der Schraubenstufe
- das nach Abzug des Motordrehmoment zur Beschleunigung der Schraubenstufe zur Verfügung stehende Beschleunigungsmoment
- die sich aus den Massenträgheitsmomenten der drehenden Teile und dem Beschleunigungsmoment ergebende Beschleunigungszeit
- die Wärmebelastung pro Startvorgang
- die sich aus Zu- und Abfuhr von Wärme ergebende Temperatur bei der höchstzulässigen Schalthäufigkeit.

Die Auslegung erfolgt so, daß das Kippmoment des Motors nicht überschritten wird.

Die Zeit für das Einkuppeln, während der Reibbeläge und Lamellen gegeneinander reiben, wird – mit einigen Zehntelsekunden – möglichst kurz gehalten. Dadurch wird erreicht, daß sich Reibbeläge und Lamellen nur wenig erwärmen und der Verschleiß dieser Teile sehr gering ist.

Für die Abnutzung von Reibflächen ist nicht das Lastmoment maßgebend, das sich erst mit zunehmender Drehzahl der Schraubenstufe aufbaut, sondern das von den Massenträgheitsmomenten abhängige Beschleunigungsmoment. So wird die Abnutzung dann äußerst gering sein, wenn leichte Bauteile, z. B. aus Aluminium oder Kunststoff verwendet werden.

## ANWENDUNGSÜBERLEGUNGEN

Die Ergebnisse der Auslegungsrechnung des Anlaufautomaten für einen Kompressortyp können dazu verwendet werden, die Auswirkung des Anlaufautomaten hinsichtlich des Energiebedarfes bzw. der Energiekostensparnis, der Bemessung von Druckluftspeicherbehältern bzw. der erreichbaren Konstanz des Netzdruckes im gesamten Anwendungsbereich dieses Kompressortyps zu untersuchen.

## ERMITTLUNG DER ENERGIEERSPARNIS

Aufbauend auf Eingabedaten und Ergebnissen der Auslegungsrechnung kann die Ersparnis an Energie abgeschätzt werden. Will man genauere Werte erhalten, so benötigt man darüber hinaus noch verschiedene Kenndaten des Elektromotors, des Ölkreislaufes bzw. der Kühlung.

Um die energiesparende Wirkung des Anlaufautomaten bei einem bestimmten Kompressortyp berechnen zu können, wurde eine PC-gestützte Näherungsrechnung entwickelt. Die Anzahl der Daten, die zur Ermittlung der Energieersparnis erforderlich sind, ist beträchtlich (siehe auch die umseitige Datentabelle zum Beispiel).

Für eine erste Abschätzung genügen die Hauptdaten der Kompressoranlage. Für nicht bekannte Daten werden – unter Berücksichtigung von Durchschnittswerten für Motoren und Kompressoren der gleichen Leistungsklasse – Ersatzwerte gebildet. Später bekanntgebene Daten (Istwerte) können nachträglich eingegeben werden; sie verbessern die Genauigkeit der Rechnung. Für die einzelnen Betriebszustände

- Start: Stern-Dreieck-Start oder Direktstart (nur mit Anlaufautomat)
- Auffüllen: Ölabscheider nach dem Start oder nach dem Leerlauf auffüllen
- Vollast: bei Nenndruck (unterer Schalterpunkt)
- Aufpumpen: des Druckluftnetzes vom unteren bis zum oberen Schalterpunkt des Druckschalters
- Leerlauf: entlastet bzw. mit Druckabsenkung
- Entlüften: Mehrverbrauch an Energie während des Entlüftungsvorganges bei dem der Druck im Ölabscheider auf Leerlaufdruck abgesenkt wird

wird der Energieverbrauch getrennt ermittelt. Durch Simulation können Einflüsse auf den Energieverbrauch des Kompressors untersucht werden. Mit EDV-Unterstützung ist es möglich, verschiedene Betriebsfälle in kurzer Zeit durchzurechnen und Kennlinien für einen Kompressortyp zu bilden.

## RECHENBEISPIEL

Die Möglichkeiten zur Energiekostensparnis werden am Beispiel eines Testkompressors gezeigt. Die Kenngrößen und der Energieverbrauch dieses Schraubenkompressors wurden bei unterschiedlichen Bedingungen sowie mit verschiedenen Regelungssystemen gemessen.

*Verglichene Regelungssysteme:*

1. *Durchlaufbetrieb:*  
Stern-Dreieck-Start, Vollast oder Leerlauf, Druck im Leerlauf abgesenkt
2. *Verzögerte Stillsetzregelung:*  
Stern-Dreieck-Start, Vollast oder Leerlauf, Druck im Leerlauf abgesenkt, Stillsetzen nach Ablauf der Nachlaufzeit
3. *Mikroprozessorgesteuerte Stillsetzregelung:*  
Stern-Dreieck-Start, Vollast oder Leerlauf, Druck im Leerlauf abgesenkt, sofortiges Stillsetzen des Kompressors bis zu der pro Stunde für konventionellen Stern-Dreieck-Start vom Erzeuger gestatteten Startanzahl; darüberhinaus Stillsetzen nach Ablauf der Nachlaufzeit.
4. *Start-Stopp-Regelung mit dem Anlaufautomaten*  
Direktstart (Motor in Dreieckschaltung), Vollastbetrieb oder Stillstand (Anm.: Die Energieverbrauchswerte für Stern-Dreieck-Start mit Anlaufautomaten liegen um ca. 1 Promille hoher)

*Druckluftanlage:*

*Annahme:* Kleines Werksluftnetz mit einem Schraubenkompressor, Antriebsleistung 18,5 kW, Ansaugmenge 2,3 m<sup>3</sup>/min, Enddruck 7 bis 8 bar Überdruck Kompressordaten siehe Tabelle der Eingabedaten. Die Rechnungen wurden für Werksluftnetze mit 1 m<sup>3</sup>, 2 m<sup>3</sup>, 4 m<sup>3</sup> und 6 m<sup>3</sup> Volumen durchgeführt.

*Betrachtungszeitraum:* 1.000 Stunden

Der Betrachtungszeitraum umfaßt sowohl die Motoreinschaltzeiten als auch die Bereitschaftszeiten, also die Stillstandszeiten zwischen den Einschaltzeiten. Die in diesem Zeitraum erzeugte Druckluftmenge ist nur von der Vollastleistung (2,3 x 60.000 = 138.000 m<sup>3</sup>) und dem Auslastungsgrad des Kompressors abhängig, nicht aber vom Regelungssystem und den am Kompressor angezeigten Betriebsstunden (= Einschaltzeiten).

Im *Beispiel* werden gezeigt:

1. Belastungstest mit erhöhter Startanzahl (entsprechend 50 % Kompressorauslastung), 32°C Ansaugtemperatur sowie Belastung durch zusätzliche Massen. Energieverbrauch und Startanzahl gemessen, Extrapolation für den gesamten Auslastungsbereich mittels PC-Programm.
2. Energieverbrauch über Kompressorauslastung – Kennlinien der vier Regelungssysteme für Druckluftnetze mit 1 m<sup>3</sup>, 2 m<sup>3</sup>, 4 m<sup>3</sup> und 6 m<sup>3</sup> Volumen.
3. Energieersparnis bei Regelung mit dem Anlaufautomaten gegenüber den anderen drei Regelungssystemen.

## EINGABEDATEN:

Daten			Anmerkungen
Ansaugmenge $V_N$	m <sup>3</sup> /min	2,30	gemessen
Ölmenge	Liter	15	festgestellt
Systemluftvolumen	Liter	40	Ölabscheider, Leitungen, gerundet
Leerlaufdruck	bar(abs)	1,80	
Leistungsbedarf			
gesamt	kW	20,5	gemessen bei 8,2 bar (abs)
Schraubenstufe	kW	17,5	rückgerechnet
Ventilator	kW	0,25	gemessen
Riemtrieb	kW	0,45	gemessen, inkl. Schlupf
Elektromotor			
Nennleistung	kW	18,5	Typenschild
Nennspannung	V	380	Typenschild
Schutzklasse		IP23	Typenschild
Isolationsklasse		F	Typenschild
Nennstrom	A	35,0	Typenschild
Nendrehzahl	min <sup>-1</sup>	2920	Typenschild, gemessen
Cos Phi bei Nennleistung		0,90	Typenschild
Wirkungsgrad, Nennleistg.		0,88	Typenschild
Stromaufnahme, Vollast	A	36,9	gemessen bei Druck 8,2 bar (abs)
Stromaufnahme, Leerlauf	A	14,9	gemessen
zulässige Startanzahl	n/Stunde	6	Betriebanleitung für konventionellen Stern-Dreieckstart
Temperaturen:			
Ansaugtemperatur, Test	°C	32	gemessen
normal	°C	20	
im ölabscheider, Test	°C	90	gemessen bei tA = 32°C
normal	°C	80	
nach Endkühler, Test	°C	56	gemessen bei tA = 32°C
normal	°C	<50	
Zeiten			
Stern-Zeit, konvent.Start	sek	4	gemessen bei konvention. Start
Auffüllzeit beim Start	sek	5	gemessen
nach Leerlauf	sek	<4	nach Leerlaufdruck gemessen
Nachlaufzeit	sek	540	gemessen - Zeitrelais
Entlüftungszeit	sek	88	gemessen (bis 1,8 bar abs)
Startzeit, Anlaufautomat	sek	5	gemessen
Massenträgheitsmomente			
Elektromotor, Rotor	kgm <sup>2</sup>	0,051	Rotor
Riemenscheibe Antrieb	kgm <sup>2</sup>	0,124	am Anlaufautomaten montiert
Schraubenstufe	kgm <sup>2</sup>	0,089	mit Riemenscheibe montiert
Anlaufautomat beim Start	kgm <sup>2</sup>	0,043	mit Ventilator
im Betrieb	kgm <sup>2</sup>	0,059	mit Ventilator

RECHENERGEBNISSE

Energieverbrauch bei Betrieb mit Anlaufautomat bei Testbedingungen

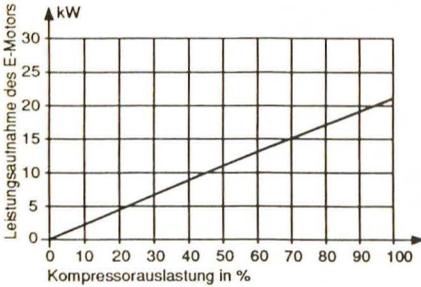


Diagramm B1

Schalhäufigkeit bei einem Druckluftnetz mit 0,75 m<sup>3</sup> Volumen (Testbedingung)

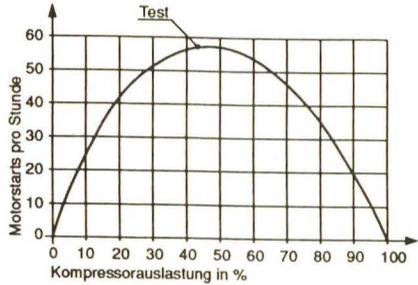


Diagramm B2

Energieverbrauch über Kompressorauslastung für 1.000 Stunden Einsatzzeit

Durchlaufbetrieb (1), verzögerte Stillsetzregelung (2), mikroprozessorgesteuerte Stillsetzregelung (3), Start-Stopp-Regelung mit Anlaufautomat (4)

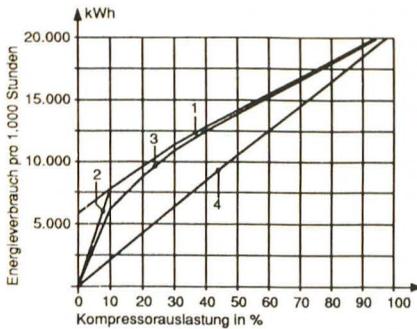


Diagramm B3: Werkluftnetz 1m<sup>3</sup>

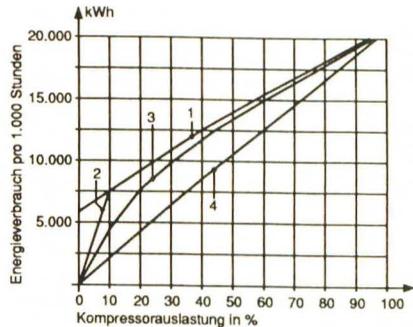


Diagramm B4: Werkluftnetz 2m<sup>3</sup>

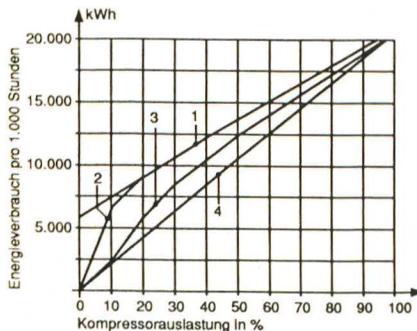


Diagramm B5: Werkluftnetz 4m<sup>3</sup>

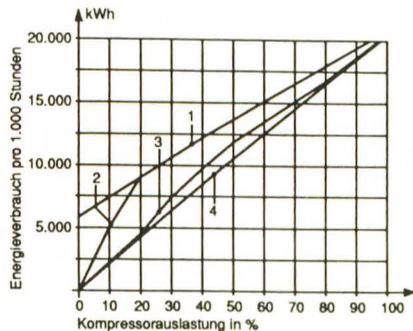


Diagramm B6: Werkluftnetz 6m<sup>3</sup>

## Energieersparnis durch Regelung mit dem Anlaufautomaten

Die Kennlinien für die Energieersparnis durch den Anlaufautomaten, also den Mehrverbrauch an Energie bei Verwendung anderer Regelungsverfahren, wurden für eine Einsatzzeit von 1.000 Stunden ( $\text{kWh}/1000\text{h}$  über % Kompressorauslastung) und Werksluftnetze mit  $1\text{m}^3$  bis  $6\text{m}^3$  Volumen errechnet. Die jährliche Ersparnis an Stromkosten ist leicht zu errechnen, wenn tatsächliche Einsatzzeiten und Auslastungsgrade eingesetzt und mit dem Strompreis multipliziert werden.

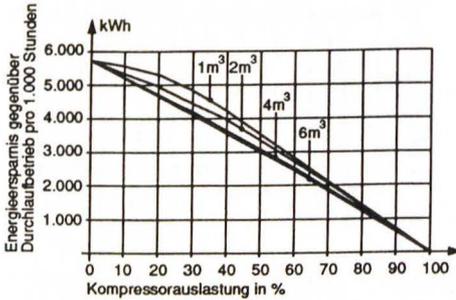


Diagramm B7: Energieersparnis durch den Anlaufautomaten gegenüber Durchlaufbetrieb

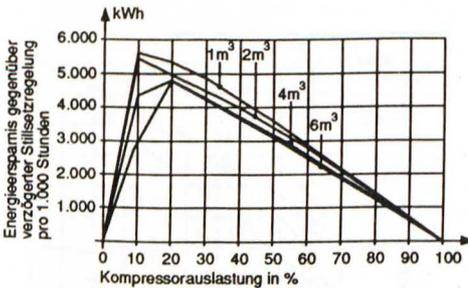


Diagramm B8: Energieersparnis durch den Anlaufautomaten gegenüber einem Betrieb mit verzögerter Stillsetzregelung

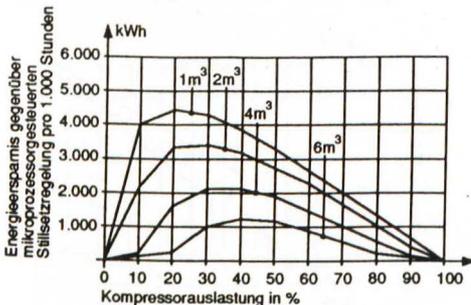


Diagramm B9: Energieersparnis durch den Anlaufautomaten gegenüber einem Betrieb mit einer mikroprozessorgesteuerten Stillsetzregelung

Die Ersparnis durch Regelung mit dem Anlaufautomaten gegenüber Durchlaufbetrieb – Diagramm B7 – ist selbst bei diesem kleinen Kompressor beträchtlich.

Die Ersparnis durch den Anlaufautomaten gegenüber der verzögerten Stillsetzregelung – Diagramm B8 – entspricht hier weitgehend der Energieersparnis gegenüber Durchlaufbetrieb. Das Stillsetzen bei Erreichen der Nachlaufzeit verringert nur bei einem relativ großen Werksluftnetz und bei geringer Kompressorauslastung den Energieverbrauch.

Die mikroprozessorgesteuerte Regelung – Diagramm B9 – wird erst bei einem größeren Werksluftnetz wirksam, wenn die Anzahl der möglichen Startvorgänge und damit auch die Anzahl der notwendigen Leerlaufperioden klein ist. Die Wirtschaftlichkeit einer Start-Stopp-Regelung kann übrigens nur dann erreicht werden, wenn die vom Werksluftnetz und der Druckschaltereinstellung her mögliche Startanzahl pro Stunde nicht größer ist als die zulässige Anzahl der Motorstarts, wenn also eine mikroprozessorgesteuerte Stillsetzregelung überhaupt nicht benötigt wird.

## Wartung

Inspektion und Service des Anlaufautomaten können im Zuge der für den jeweiligen Kompressortyp vorgeschriebenen Arbeiten erfolgen. Diese sind üblicherweise an die Betriebsstunden, also an die vom Auslastungsgrad des Kompressors abhängige Einschaltzeit des Elektromotors gebunden.

Bei der Inspektion wird der Zustand des Anlaufautomaten, insbesondere die Dicke der Reibbeläge überprüft. Ein Service ist durchzuführen, wenn der Reibbelag auf 2 mm Dicke abgenutzt ist. Nach Abschrauben der Schaltkammer (siehe Beschreibung) werden die Lamellen ausgetauscht. Bei Anlaufautomaten mit einer Reibfläche ist – so wie bei Scheibenbremsen – fallweise auch die Reibfläche am Gehäuse (8) zu überdrehen.

## Ersatzteile

Die Lebensdauer der Reibbeläge hängt von verschiedenen Faktoren ab, die in der Auslegungsrechnung des Anlaufautomaten berücksichtigt werden: von der Anzahl der Starts, der Schleifzeit beim Einkuppeln, den Massenträgheitsmomenten, u.a.m. Zur Beurteilung der Wirksamkeit verschiedener Einflüsse auf die Lebensdauer der Ersatzteile wurden Dauertests über 10.000 bis 230.000 Motorstarts durchgeführt. Diese Tests wurden wegen der geringen Abnutzung der Reibbeläge (0,01 bis 0,02 mm pro Reibfläche bei 1.000 Starts) großteils unter Extrembedingungen im 24-Stunden-Betrieb gefahren. Nur so konnten in vertretbarer Zeit bewertbare Ergebnisse erzielt werden, die auf die verfügbare Reibbelagsdicke (bis 6 mm) hochgerechnet wurden.

Wird für eine grobe Abschätzung des Serviceintervalls von einer nur auf die Anzahl der Motorstarts bezogenen Lebensdauer der Reibbeläge ausgegangen, so lassen sich Einsatzdauer bzw. Betriebsstunden durch die Kennlinie Starthäufigkeit über Kompressorauslastung ermitteln. Da Kompressoren nicht immer mit der gleichen Auslastung betrieben werden, sind praxisnahe Werte nur über Modellrechnung für Anwendungsfälle zu erhalten:

Wird – als Beispiel – für einen Anlaufautomaten für 37 kW von einer Lebensdauer der Reibbeläge von 200.000 Motorstarts und maximal 30 Starts pro Stunde ausgegangen, so ergeben sich für konstante Kompressorauslastung im Bereich 20 bis 80% Einsatzzeiten zwischen 7.000 und 11.000 Stunden. Für wechselnde Auslastung errechnen sich um 10 bis 30% höhere Werte. Bei kleineren Motorleistungen ist sowohl die Anzahl der pro Stunde zulässigen Starts als auch die zu erwartende Lebensdauer der Reibbeläge höher.

## Amortisation

Bei allen Überlegungen sind sowohl die Anschaffungskosten des Kompressors als auch die Auswirkungen auf die Gestaltung der Druckluftanlage – beides Investitionskosten – zu berücksichtigen, die laufenden Betriebskosten sowie der Instandhaltungsaufwand:

- Bereits bestehende Kompressortypen sind durch die vorgegebene Anordnung ihrer Komponenten in unterschiedlichem Ausmaß für die Installation eines Anlaufautomaten und den Umbau der Regelung auf Start-Stopp-Betrieb geeignet. Bei Neukonzipierung eines Kompressortyps mit Anlaufautomat verringert das Wegfallen bzw. die Vereinfachung verschiedener Bauteile sowie die einfachere Leitungsführung die Anschaffungskosten, die Kosten des Anlaufautomaten kommen hinzu.
- Die mit einer einfacheren Gestaltung einer Druckluftanlage zusammenhängenden Fragen gehen über den Rahmen dieses Beitrages hinaus. Sie sind mit den Anwendern der Kompressoren zu diskutieren.
- Die Möglichkeiten, durch Start-Stopp-Regelung mit dem Anlaufautomaten Stromkosten in beträchtlichem Ausmaß zu sparen, wurde durch ein einfaches Beispiel – Druckluftanlage mit einem 18 kW-Schraubenkompressor – gezeigt.
- Die Wartungsintervalle entsprechen den für Schraubenkompressoren üblichen Zeiten. Der Aufwand für den Austausch der Reibbeläge ist im Vergleich zur erheblichen Reduktion der Stromkosten gering.