

Grundlagen der Vakuumtechnik, Kurzübersicht

Einführung

Grundlagen der Vakuumtechnik		
Was ist Vakuum?	Vakuumbereiche	Verwendete Maßeinheiten
<p>Der Zustand in einem Raum, der frei von Materie ist („absolutes Vakuum“).</p> <p>In der Praxis spricht man schon von Vakuum, wenn der Luftdruck in einem Raum unter dem der Atmosphäre liegt.</p>		<p>Es gibt eine Vielzahl nationaler und internationaler Maßeinheiten. Die gängigsten Einheiten sind wohl Pascal (Pa) und bar.</p> <p>100 Pa = 1 hPa 1 hPa = 1 mbar 1 mbar = 0,001 bar</p> <p>Oft wird die Vakuumhöhe auch in % dargestellt, gemeint sind dabei immer relative Werte.</p> <p>GV = Grobvakuum FV = Feinvakuum HV = Hochvakuum UHV = Ultrahochvakuum</p>

Wozu Vakuum?	Messen von Druck bzw. Vakuum	Der atmosphärische Druck
<p>Vakuum ist mittlerweile fester Bestandteil in der Forschung von Chemie, Biologie und Physik. Außerdem ist es unverzichtbar in wichtigen Industrieprozessen.</p>	<p>Im Bereich des Grobvakuums werden hauptsächlich mechanische, aber auch digitale Manometer verwendet. Im Hoch- und Ultrahochvakuum verwendet man hochsensible Druckmessgeräte.</p>	<p>1 Mount Everest 2 Festo 3 Meereshöhe</p>

Vakuum zum Verständnis	Angabemöglichkeiten von Vakuum	Auswirkungen auf die Vakuumtechnik
<p>Die Luft ist ein Gasgemisch mit ca. 10^{25} Teilchen pro m^3 Luft bei einem bar Luftdruck. Teilchen üben Druck bzw. Kraft auf die Wände des definierten Raumes aus. Je weniger Teilchen im Raum, desto niedriger die Kraft auf die Wände.</p> <p>Druck = $\frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$</p> <p>Ein 100%iges Vakuum würde bedeuten, dass keine Teilchen vorhanden sind. Druck = 0.</p>	<p>Als absoluter Wert, d. h. mit positivem Vorzeichen von 1 bis 0 bar als absoluter Nullpunkt. Oder als relativer Wert mit negativem Vorzeichen von 0 bis -1 bar, mit 0 als Bezugspunkt, oder in %.</p>	<p>Mit zunehmender Höhe sinkt der Luftdruck in der Atmosphäre. Aus diesem Grund verringert sich auch das erreichbare Vakuumniveau eines Ejektors. Allerdings bleibt das Leistungsniveau von hier 80% unverändert gleich.</p>

Grundlagen der Vakuumtechnik, Kurzübersicht

Einführung

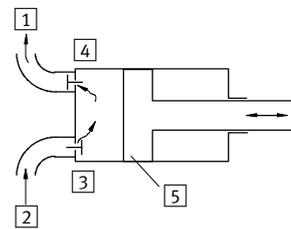
FESTO

Komponenten zur Vakuumerzeugung

Die Vakuum-Ejektoren	Verdränger-Vakuumpumpen	Kinetische Vakuumpumpen
Diese funktionieren nach dem Prinzip von Venturi, d. h. sie sind rein pneumatisch getrieben und im Vergleich zu anderen Vakuumerzeugern sehr einfach aufgebaut.	In einen Raum einströmende Luft wird mechanisch abgesperrt, verdichtet und ausgestoßen. Dabei kann ein sehr hohes Vakuum bei sehr geringem Volumenstrom erzielt werden.	Die Luft wird durch zusätzliche mechanische Einwirkung zu einer Strömung in Förderrichtung gezwungen. Dabei wird nur ein relativ geringes Vakuum bei allerdings hohem Saugvolumen erreicht.

Prinzip

- Wichtigste Komponenten sind die Strahldüse (Venturi-Düse) und mindestens eine Empfängerdüse.
- Beschleunigte Druckluft erzeugt zwischen den beiden Düsen eine Sogwirkung (Vakuum).
- Es gibt verschiedene Aufbauprinzipien: ein- und mehrstufige Ejektoren.
- Je nach Prinzip wird Luft entweder durch ein rotierendes Laufwerk an der Saugseite in einen Strom mitgerissen oder mit Schaufelkammern verdichtet.
- Als Pumpentypen gibt es z. B. Vakuumbergeber und Vakuumpumpenverdichter.



- 1 Druckseite
- 2 Saugseite
- 3 Einlassventil
- 4 Auslassventil
- 5 Kolben

Merkmale

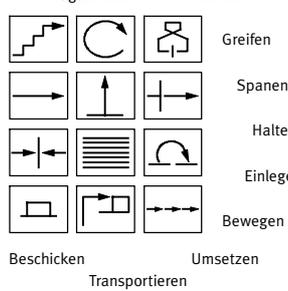
- Hohes Vakuum bei relativ geringem Volumenstrom
- Wartungs- und verschleißfrei
- Kostengünstig
- Kompakte Bauweise und geringes Gewicht
- Beliebige Einbaulage
- Hohes Vakuum bis $-0,98$ bar Betriebsdruck
- Geringer Wartungsaufwand
- Meist große Abmessungen und hohes Gewicht
- Beschränkung in der Einbaulage
- Große Volumenströme, geringes Vakuum
- Hoher Wartungsaufwand

Anwendung

- Verschiedenste Einsatzgebiete, z. B. in der Handhabungs- und Verfahrenstechnik.
- Sehr großes Anwendungsspektrum in Industrie und Forschung.
- Hauptsächlich bei präzise definierten Prozessen in der Industrie.

Grundlagen der Vakuumtechnik, Kurzübersicht

Einführung

Vakuum in der Handhabungstechnik			
Sinnvoller Einsatz von Vakuum	Wichtige Auswahlfaktoren		Vorteile von Vakuum
Die große Variantenvielfalt der Vakuumkomponenten ermöglicht den optimalen Einsatz in vielen industriellen Anwendungen.	<p>Anheben Fördern</p> <p>Magazinieren Wenden</p>  <p>Greifen</p> <p>Spanen</p> <p>Halten</p> <p>Einlegen</p> <p>Bewegen</p> <p>Beschriften Umsetzen</p> <p>Transportieren</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Gewicht, Temperatur, Form und Rauheit der Werkstückoberfläche • Geschwindigkeit pro Zeiteinheit • Hub- und Transportwege 	<ul style="list-style-type: none"> • Sanftes Handling • Kompakter, platz- und gewichtsparender Aufbau • Schnelle Taktzeiten möglich • Niedriger Wartungsaufwand • Kostengünstig

Ejektoren im Vergleich		
Größen/Kriterien	Einstufig	Mehrstufig
Saugvolumenstrom	durchschnittlich	hoch bei niedrigem Vakuumniveau bis ca. 50%
Evakuierungszeit	sehr kurz im höheren Vakuumbereich ab 30 ... 50%	sehr kurz im niedrigeren Vakuumbereich bis 30 ... 50%
Anschaffungskosten	gering	relativ hoch
Geräuschentwicklung	relativ hoch	gering

Beide Prinzipien haben Vor- und Nachteile, die schwer miteinander zu vergleichen sind. Mit optimal abgestimmten Komponenten

ist in beiden Prinzipien ein großes Spektrum an Anwendungsgebieten möglich.

Wichtige Vergleichsgrößen			
Evakuierungszeit	Luftverbrauch	Wirkungsgrad	Saugvolumenstrom
Evakuierungszeit = Zeit (s), um ein bestimmtes Vakuum zu erzeugen.	Luftverbrauch = Luftverbrauch (l/min) des Ejektors, um ein bestimmtes Vakuum zu erzeugen.	Einen effektiven Vergleich der unterschiedlichen Prinzipien ermöglicht die Wirkungsgradformel: Wirkungsgrad = Evakuierungszeit, Luftverbrauch und Volumen in Abhängigkeit vom Vakuum.	Irrtümlicherweise wird der Leistungsgrad eines Ejektors nicht selten am Saugvolumenstrom bei 0 bar gemessen. Saugvolumenstrom = Saugluftmenge (l/min), die ein Ejektor ansaugen kann.

Vakuum in der Handhabungstechnik

Energiekostenvergleich

Um aus atmosphärischer Luft Druckluft zu erzeugen, ist bei Betrachtung der Kosten (z. B. Investitionen, Material, Lohn etc.) mit einem Aufwand von ca. 0,02 € pro m³ Volumen auf 7 bar Druck zu rechnen.

Vakuum-Ejektoren:

- Hoher Luftverbrauch, der aber durch seine Energiesparfunktion relativiert wird
- Wartungsfrei, ohne bewegliche Teile
- Geringes Gewicht und Abmessungen der Komponenten sowie beliebige Einbaulage
- Keine elektrischen Anschlüsse notwendig
- Relativ hohes Vakuumniveau (bis 85% Vakuum) erreichbar
- Geringe Anschaffungskosten

Elektrische Vakuumpumpen:

- Sehr hohes Vakuum (bis 99,99%) erreichbar
- Hohe Saugvolumen (Vakuumgebläse) von bis zu 1 200 m³/Std. möglich
- Hoher Stromverbrauch durch dauerbetriebene Pumpen
- Hohe Anschaffungskosten und permanenter Wartungsaufwand
- Großes Gewicht, Bauvolumen sowie vorgegebene Einbaulagen

Der Vergleich von Merkmalen, ein Rechenbeispiel sowie ein Energiekostenvergleich → folgende Abschnitte.

Leckage in Vakuumsystemen

Kann ein Vakuumsauggreifer das System gegen die atmosphärische Luft nicht völlig abdichten, spricht man von leckenden Systemen.

Gründe hierfür sind z. B. rauhe und unebene Werkstückoberflächen oder luftdurchlässige Materialien der Werkstücke.

Abhilfemöglichkeiten, um das erforderliche Vakuumniveau zu erreichen:

- Einsatz von leistungsstärkeren Ejektoren
- Verringerung des Sauger-Durchmessers.

Auswahlhilfe von Vakuumerzeugern bei Leckfluss

Empfohlen wird in jedem Fall ein Versuchsaufbau, um die Leckrate zu ermitteln und somit den erforderlichen Vakuum-Ejektor bestimmen zu können.

Vorgehensweise:

- Feststellung der Leckrate
 - Versuchsaufbau
 - Ablesen des erreichten Vakuumwertes
 - Vergleich Ergebnis mit Kurvenverlauf im Diagramm Saugvermögen in Abhängigkeit vom Vakuum (→ 28),
 - Differenz zum Saugvermögen = Leckrate

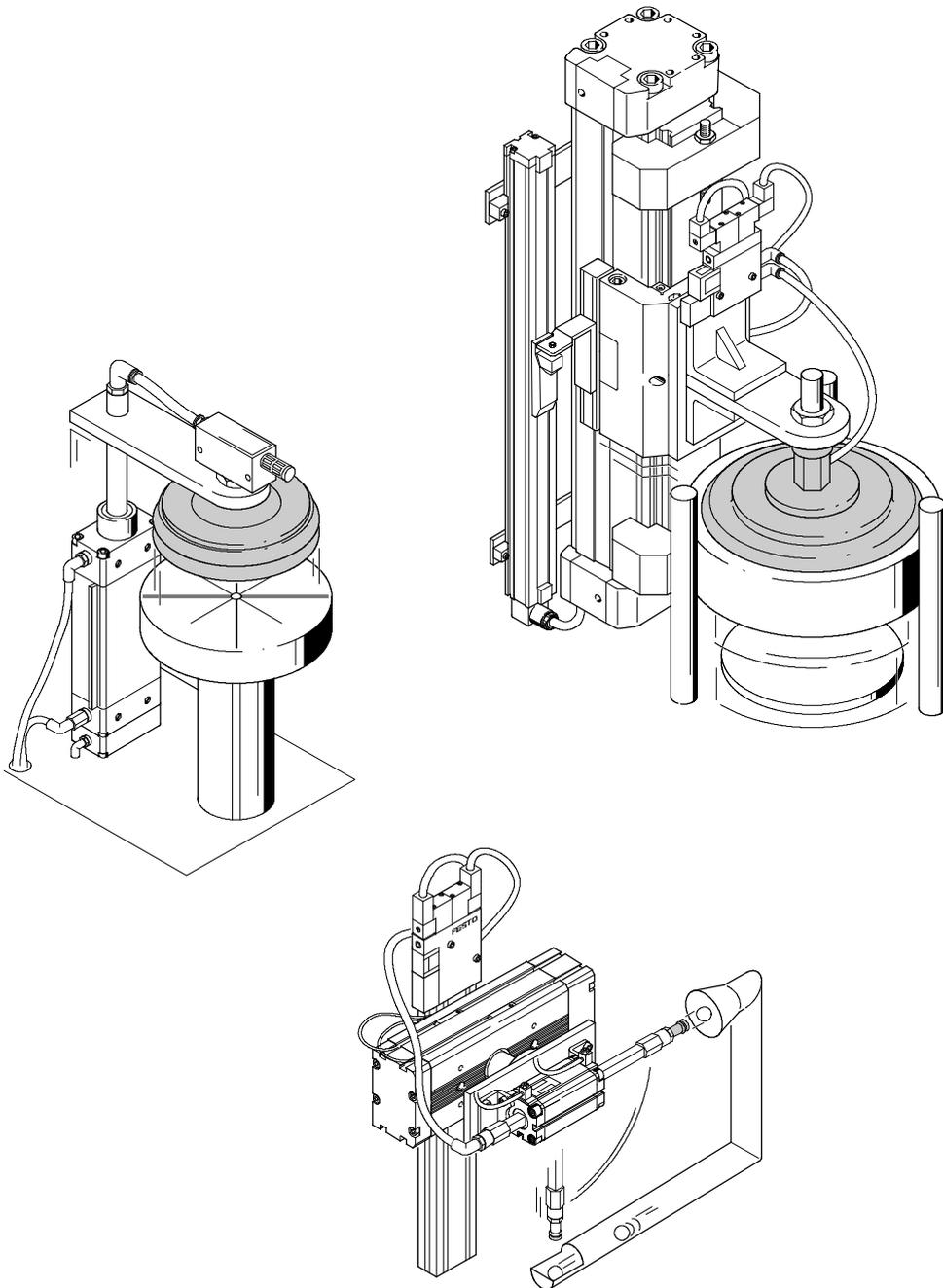
- Ermittlung der richtigen Ejektorgröße
 - Schnittpunkt der nun bekannten Leckrate mit Kurven anderer Ejektoren
 - Ermittlung des erreichbaren Vakuums durch Projektion der Schnittpunkte mit der Leckrate nach unten
- Auswahl des Ejektors, der das erforderliche Vakuumniveau erreicht.

Grundlagen der Vakuumtechnik, Kurzübersicht

Einführung

FESTO

Anwendungsbeispiele



Was ist Vakuum?

„Das Vakuum ist experimentell erreichbare Leere“, so definiert es die Physik, – das Nichts also. Gemeint ist der Zustand in einem Raum, der frei von Materie ist (bisher oft „absolutes Vakuum“ genannt).

In der Praxis ist dieser Zustand aber nicht umsetzbar. Man spricht deshalb schon von Vakuum, wenn der Luftdruck in einem Raum unter dem der Atmosphäre liegt bzw. die Dichte von Luftmolekülen reduziert ist.

Jeder Raum enthält außerdem Teilchen der Materie wie Protonen und Elektronen sowie masselose Teilchen, die Photonen, deren Eigenschaft es ist, mit Lichtgeschwindigkeit Energie zu transportieren.

Wozu Vakuum?

Seit dem 17. Jahrhundert („Magdeburger Halbkugeln“) beschäftigt das Vakuum die Menschheit. Mittlerweile ist Vakuum nicht mehr aus der modernen Forschung wegzudenken.

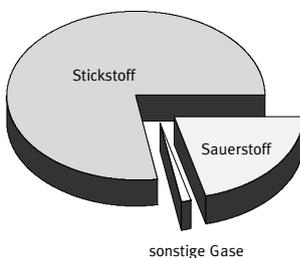
In der Chemie werden Reaktionen von Stoffen im Vakuum untersucht, die Biologie interessiert sich für die Wirkungen des Vakuums auf Organismen, und Bereiche der Physik (Quantenphysik, Feldtheorie etc.) beschäftigen sich allgemein mit Teilchen, deren Eigenschaften im luftleeren Raum genauer erforscht werden.

Mittlerweile hat das Vakuum auch Einzug in wichtige Industrieprozesse gefunden, die ohne Vakuum nicht realisierbar wären. Als Beispiele sind die Halbleiterherstellung oder die Massenspektroskopie zu erwähnen.

Auch im Bereich der Handhabungstechnik, d. h. heben, halten, drehen und transportieren von Teilen aller Art, wurden durch die Vakuumtechnologie neue Möglichkeiten entwickelt und eingesetzt.

Vakuum zum Verständnis

Die Luft ist ein Gasgemisch, das pro m^3 bei 1 bar Luftdruck ca. 10^{25} Teilchen enthält.



Dieses Gasgemisch setzt sich in der Atmosphäre aus folgenden Gasen und Anteilen zusammen.

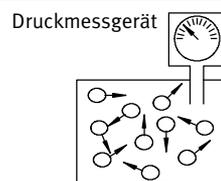
- 78% Stickstoff
- 21% Sauerstoff
- 1% Sonstige Gase (z. B. Kohlendioxid und Argon)

Um einen Zustand des Vakuums zu erreichen, muss der Raum leer, das bedeutet auch frei von gasförmigen Stoffen sein. Die Konsequenz davon ist, dass der Druck in diesem Raum sehr klein ist, weil keine oder nur wenige Teilchen enthalten sind, die durch ihre Stöße gegen die Wände eine Kraft auf eine Fläche ausüben.

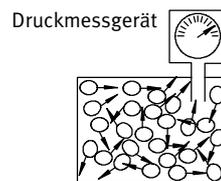
Der Druck ist deshalb folgendermaßen definiert:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$$

Theoretisch wäre bei einem vollständigen Vakuum, d. h. wenn keine Teilchen von Materie im Raum mehr vorhanden sind, der Druck = 0.



kleine Teilchenzahl bei gleicher Temperatur
→ niedriger Druck



große Teilchenzahl bei gleicher Temperatur
→ hoher Druck

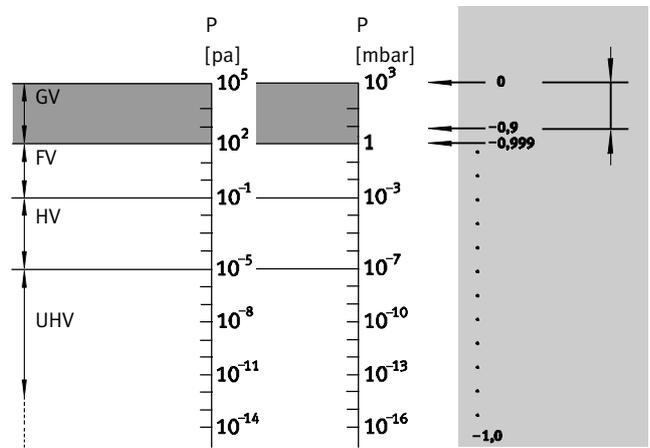
In der Realität ist dies jedoch kaum umsetzbar, der Druck wird bei einem Ultrahochvakuum zwar schon recht niedrig (ca. 10^{-8} bis 10^{-11} mbar), doch die Teilchendichte beträgt dann immer noch ca. $2,5 \times 10^{13}$ Teilchen pro m^3 . Es gilt deshalb:
Je weniger Teilchen, desto kleiner der Druck.

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Vakuumbereiche

In der Praxis ist es üblich, den großen Vakuumbereich von technisch erzeugbarem Vakuum, der heute mehr als 16 Zehnerpotenzen umfasst, in einzelne kleinere Bereiche zu unterteilen. Dabei werden nach physikalischen Erscheinungen und technischen Erfordernissen folgende Vakuumbereiche unterschieden.



Handlungsbereich:
In diesem Bereich kommt Vakuum in der Handhabungstechnik zum Einsatz.

- GV = Grobvakuum
- FV = Feinvakuum
- HV = Hochvakuum
- UHV = Ultrahochvakuum

Vakuumbereich	Druckbereich (absolut)	Anwendungen
Grobvakuum	Umgebungsdruck ... 1 mbar	Anwendungsbereich der industriellen Handhabungstechnik. In der Praxis wird hier die Höhe des Vakuums oft in Prozent angegeben, d. h. Vakuum wird im Verhältnis zu seinem Umgebungsdruck definiert. Das Material und die Oberflächenbeschaffenheit von Werkstücken spielt bei Vakuum-Anwendungen eine große Rolle.
Feinvakuum	10 ⁻³ ... 1 mbar	Stahlgasung, Produktion von Glühlampen, Trocknung von Kunststoffen, Gefriertrocknung von Lebensmitteln etc.
Hochvakuum	10 ⁻³ ... 10 ⁻⁸ mbar	Schmelzen oder Glühen von Metallen, Herstellung von Elektronenröhren.
Ultrahochvakuum	10 ⁻⁸ ... 10 ⁻¹¹ mbar	Zerstäuben von Metallen, Aufdampfen (Beschichten) von Metallen sowie Elektronenstrahl-Schmelzen.

Messen des Druckes bzw. des Vakuums

Druck wird definiert als Kraft pro Flächeneinheit. Die Luft ist ein Gasgemisch, das aus vielen Partikeln (Atome und Moleküle) besteht. Diese Partikel sind in ständiger Bewegung. Treffen sie irgendwo auf, so üben sie dort eine Kraft aus. Die Druck- bzw. Vakuummessung definiert sich dadurch, dass man eine Flächeneinheit bestimmt und die Anzahl sowie die Intensität dieser Stöße auf dieser Fläche gemessen wird. Messungen sind notwendig, um Vorgänge kontrollieren und überprüfen zu können.



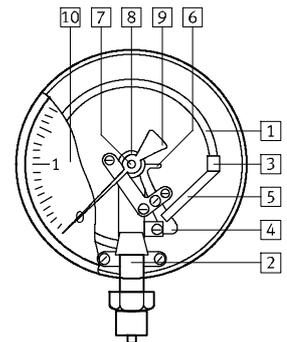
Aus diesem Grund müssen alle Messgeräte „kalibriert“ sein, d. h. einzelne funktionsgleiche Messgeräte müssen so justiert sein, dass sie bei gleichen Voraussetzungen die gleichen Messergebnisse liefern. Um das Medium Vakuum zu bewerten bzw. zu messen, gibt es verschiedene technische Einrichtungen, die für Anwendungen in Industrie und Forschung unerlässlich sind. Im Regelfall bzw. im Bereich des Grobvakuums werden dazu Manometer (Vakuummeter) verwendet, die je nach erforderlicher Genauigkeit unterschiedlich skaliert sind. Bei den Manometern gibt es mehrere Funktionsprinzipien, die mechanisch oder digital funktionieren.

Die bekanntesten mechanischen Funktionstypen sind:

- Rohrfeder-Manometer,
- Kapselfeder-Manometer,
- Plattenfeder-Manometer,
- Digitale Manometer.

Im Bereich von Hoch- und Ultrahochvakuum werden Druckmessgeräte verwendet, die hochempfindlich reagieren. Dabei spielen bei der Ermittlung von Messergebnissen noch viele andere Faktoren eine Rolle.

Es ist zu beachten, dass es zwei verschiedene Möglichkeiten gibt, um ein und dasselbe Messergebnis unterschiedlich anzugeben bzw. darzustellen.



- 1 Rohrfeder
- 2 Federträger
- 3 Federendstück
- 4 Segment
- 5 Zugstange
- 6 Verzahnung
- 7 Zeigerwelle
- 8 Spiralfeder
- 9 Zeiger
- 10 Zifferblatt

Verwendete Bezeichnungen und Angabemöglichkeiten von Vakuum

An dieser Stelle soll erwähnt sein, dass es für den Begriff Vakuum im umgangssprachlichen, aber auch technischen Sprachgebrauch mehrere Bezeichnungen gibt. Um Unklarheiten zu beseitigen oder Missverständnissen vorzubeugen, sollen diese hier erläutert werden.

Vakuum	Vakuumdruck	Unterdruck
Korrekte Bezeichnung – Angabe nur in % im Bereich zwischen 0 ... 1 bar absoluter Druck.	Bezeichnung ist nicht korrekt, da der Begriff Vakuum an sich schon als Druckangabe steht.	Bezeichnung ist nicht mehr gebräuchlich und sollte möglichst auch nicht mehr verwendet werden.

Betriebsdruck Vakuum als absoluter Wert Vakuum als relativer Wert

<p>Korrekte Bezeichnung, Betriebsdruck 0 bar relativer Druck, bedeutet 1 bar absoluter Druck. Vakuum wird in der Regel als relativer Betriebsdruck, also mit negativem Vorzeichen angegeben.</p> <p>Um den Betriebsdruck korrekt anzugeben, gibt es zwei Möglichkeiten: als relativer oder als absoluter Wert. Beide Angabemöglichkeiten werden auch im Bereich Vakuum verwendet und sollen im Folgenden verdeutlicht werden.</p>	<p>Anwendung: Im Bereich der Wissenschaft und im Fein- und Hochvakuum.</p> <p>Prinzip: Das Vakuum wird als Absolutwert im Verhältnis zum absoluten Nullpunkt angegeben, d. h. 0 bar ist der niedrigste Wert und entspricht 100% Vakuum. Im Vakuumbereich ist somit 1 bar der höchste Wert und entspricht dem durchschnittlichen Umgebungsdruck.</p> <p>Merkmal: Positive Vorzeichen der Vakuumwerte. Vakuumbereich 1 ... 0 bar</p>	<p>Anwendung: Im Bereich des Grob- oder Arbeitsvakuums (z. B. Anwendung bei Festo).</p> <p>Prinzip: Das Vakuum wird als Relativwert in seinem Verhältnis zum Umgebungsdruck angegeben, d. h. der angegebene Vakuumwert hat ein negatives Vorzeichen, weil der Umgebungsdruck (Atmosphärendruck) als Bezugspunkt mit 0 angenommen wird. Der niedrigste Wert, also auch 100% Vakuum entsprechen –1 bar relativem Betriebsdruck.</p> <p>Merkmal: Negative Vorzeichen der Vakuumwerte. Vakuumbereich 0 ... –1 bar</p>
---	--	---

Angabemöglichkeiten von Druck bzw. Vakuum

Betriebsdruck [bar]	Vakuum [%]	Absoluter Druck [bar]
6	–	7
5		6
4		5
3		4
2		3
1		2
0	0	1
–0,1	10	0,9
–0,2	20	0,8
–0,3	30	0,7
–0,4	40	0,6
–0,5	50	0,5
–0,6	60	0,4
–0,7	70	0,3
–0,8	80	0,2
–0,85	85	0,15
–0,9	90	0,1
–0,95	95	0,05
–1	100	0

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Verwendete Maßeinheiten

Wie unter dem Abschnitt „Bezeichnungen und Angabemöglichkeiten“ beschrieben, gibt es zwei Angabemöglichkeiten, um Vakuum anzuzeigen:

- Als Druckeinheit (relativ oder absolut)
- Als Prozentzahl

Für die Angabe von Vakuum als Druckeinheit gibt es eine Vielzahl national und international gebräuchlicher Maßeinheiten.

Diese sind in der folgenden Umrechnungstabelle (Internationale Vakuum-/Druck-Umrechnungstabelle) aufgeführt.

Zu erwähnen ist, dass die gegenwärtig gültige und offizielle Maßeinheit für Vakuum Pascal (Pa) ist. Allerdings kommt diese in der Praxis kaum zur Anwendung. Vielmehr werden in der Praxis, vor allem im Bereich Grobvakuum (z. B. Handhabungstechnik), bevorzugt bar, mbar oder % als Maßeinheiten verwendet.

Auch auf den folgenden Seiten werden ausschließlich die Maßeinheiten bar und % verwendet.

Bei Vakuumangaben in bar sind diese immer als Relativwert (beschrieben unter „Vakuum als Relativwert“) betrachtet.

Die wichtigsten gebräuchlichen Druckeinheiten stehen in folgendem Größenverhältnis zueinander:

$$100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar}$$

$$1 \text{ mbar} = 0,001 \text{ bar}$$

Der Einfachheit halber wird in den meisten Fällen Vakuum als Prozentzahl von 0 bis 100% verwendet.

Gemeint ist dabei immer ein relativer Wert.

Um diese Werte in ein Verhältnis zu den anderen Maßeinheiten zu bringen, soll die untere Umrechnungstabelle (Internationale Vakuum-/Druckumrechnungstabelle im Vergleich absolut und relativ), dienen.

Internationale Vakuum-/Druck-Umrechnungstabelle

Einheit	bar	N/cm ²	kPa	atm, kp/cm ²	m H ₂ O	Torr, mm Hg	in Hg	psi
bar	1	10	100	1,0197	1,0197	750,06	29,54	14,5
N/cm ²	0,1	1	10	0,1019	0,1019	75,006	2,954	1,45
kPa	0,01	0,1	1	0,0102	0,0102	7,5006	0,2954	0,145
atm, kp/cm ²	0,9807	9,807	98,07	1	1	735,56	28,97	14,22
m H ₂ O	0,9807	9,807	98,07	1	1	735,56	28,97	14,22
Torr, mm Hg	0,00133	0,01333	0,1333	0,00136	0,00136	1	0,0394	0,0193
in Hg	0,0338	0,3385	3,885	0,03446	0,03446	25,35	1	0,49
psi	0,0689	0,6896	6,896	0,0703	0,0703	51,68	2,035	1

Internationale Vakuum-/Druck-Umrechnungstabelle im Vergleich absolut und relativ

Relatives Vakuum [%]	Restdruck absolut [bar]	Druck relativ [bar]	N/cm ²	kPa	atm, kp/cm ²	m H ₂ O	Torr, mm Hg	in Hg
10	0,9	-0,101	-1,01	-10,1	-0,103	-0,103	-76	-3
20	0,8	-0,203	-2,03	-20,3	-0,207	-0,207	-152	-6
30	0,7	-0,304	-3,04	-30,4	-0,31	-0,31	-228	-9
40	0,6	-0,405	-4,05	-40,5	-0,413	-0,413	-304	-12
50	0,5	-0,507	-5,07	-50,7	-0,517	-0,517	-380	-15
60	0,4	-0,608	-6,08	-60,8	-0,62	-0,62	-456	-18
70	0,3	-0,709	-7,09	-70,9	-0,723	-0,723	-532	-21
80	0,2	-0,811	-8,11	-81,1	-0,827	-0,827	-608	-24
90	0,1	-0,912	-9,12	-91,2	-0,93	-0,93	-684	-27

Der atmosphärische Luftdruck

Definition

Unsere Erde und somit auch wir und alles was sich an der Oberfläche der Erde befindet, ist von einer mehrere Kilometer dicken Luftschicht umgeben. Diese Luftschicht wird als Erdatmosphäre oder einfach nur Atmosphäre bezeichnet. Das Gewicht dieser Luftmasse drückt, hervorgerufen durch die Erdanziehungskraft, auf die Erdoberfläche und erzeugt einen Druck, der Atmosphärendruck oder Luftdruck genannt wird.

Man kann unsere Atmosphäre auch mit den Verhältnissen unter Wasser vergleichen. Wir leben am Grunde eines „Luftmeeres“. Die Gewichtskraft der über uns liegenden Luft erzeugt einen Schweredruck, den Luftdruck. Die gegenwärtig gültige Maßeinheit des Luftdrucks ist hPa. Diese Abkürzung steht für Hektopascal (1 hPa = 1 mbar).

Im Mittel beträgt der Luftdruck auf Meereshöhe 1 013,25 mbar. Stellt man sich eine Luftsäule mit einer Querschnittsfläche von 1 m² vor, die von der Erdoberfläche (Meereshöhe-Niveau) bis an den äußersten Rand der Atmosphäre reicht, so lastet die Luft auf diesem 1 m² der Erdoberfläche mit einer Masse von ca. 10 000 kg.



Hinweis

Die NASA spricht bei einer Höhe von ca. 120 km über der Erdoberfläche, vom äußersten Rand der Atmosphäre. Allerdings gibt es ein Vorkommen von Luftmolekülen in noch weitaus größeren Höhen. Somit ist der „Rand“ der Atmosphäre nicht definitiv festzulegen.

Steigt man nun ausgehend von der Meereshöhe immer höher, so verkürzt sich diese imaginäre Luftsäule und gleichzeitig verringert sich die Luftmasse. Da der Luftdruck sich bei abnehmender Luftmasse verringert, sinkt deshalb der atmosphärische Luftdruck mit zunehmender Höhe. Man sagt „die Luft wird dünner“.

Der Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe lässt sich anhand der Barometrischen Höhenformel berechnen. In diese Formelberechnung fließen unterschiedlichste Faktoren ein.

Um genaue Werte zu erzielen, müßten neben der Ausgangshöhe Faktoren wie die örtliche Schwerkraft, die Luftdichte sowie die Temperatur berücksichtigt werden.

Zur Vereinfachung wird bei der Formelherleitung die Temperatur und Masse der Luft als Konstante betrachtet.

Die Dichte der Luftschicht (ρ) sowie der Druck an der Erdoberfläche ($p_{(h=0)}$) beruhen in der Herleitung auf einer Annahme aus Erfahrungswerten.

Diese Maßnahmen bzw. Vereinfachung der Formelherleitung stellen eine Idealisierung dar.

$$p(h) = p_{(h=0)} \exp\left\{\frac{-\rho \times gh}{p_{(h=0)}}\right\}$$

$p(h)$ = Luftdruck in Abhängigkeit der Höhe

$p_{(h=0)}$ = Druck an der Erdoberfläche (1,013 bar)

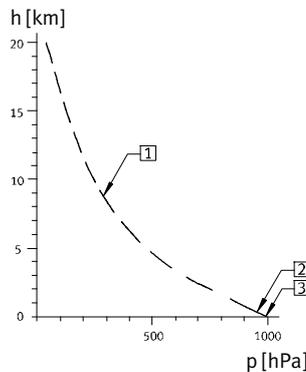
ρ = Dichte der Luftschicht (1,29 kg/m³)

h = Höhe

g = Erdbeschleunigung

Allgemein gültige Aussagen

- Auf Meereshöhe beträgt der atmosphärische Druck ca. 1 013 mbar.
- Bis 2 000 m über dem Meeresspiegel sinkt der Druck um ca. 1% pro 100 m auf 763 mbar.
- Bei ca. 5 500 m beträgt der Druck nur noch 50% vom Druckniveau auf Meereshöhe.
- Auf der Spitze des Mount Everest (8 848 m) beträgt der atmosphärische Druck nur noch 330 mbar.
- Auf 16 000 m Höhe sind es 90 mbar, 15 mbar auf 30 000 m und ca. 8 mbar in 50 000 m Höhe.



- 1 Mount Everest
- 2 Festo
- 3 Meereshöhe

Auswirkung von Luftdruckänderungen auf die Vakuumtechnik

Der Druckverlust mit zunehmender Höhe hat natürlich auch Auswirkungen auf die Vakuumtechnik bzw. auf die Vakuumherzeuger selbst.

Dadurch, dass der Luftdruck in der Atmosphäre mit zunehmender Höhe abnimmt, verringert sich auch die maximal erreichbare Druckdifferenz und somit auch die maximal erreichbare Haltekraft eines Vakuumsauggreifers, d. h. das erreichbare Vakuum-Niveau eines Vakuum-Ejektors verringert sich mit zunehmender Höhe, bei allerdings gleichbleibendem Leistungsniveau von z. B. 80% Vakuum (→ Abbildung rechts).

Wie schon erwähnt, beträgt der Luftdruck auf Meereshöhe (0 m) ca. 1 013 mbar.

Ein Vakuumherzeuger mit einem Leistungsniveau von 80% Vakuum erreicht auf Meereshöhe einen absoluten Druck von ca. 0,2 bar (200 mbar).

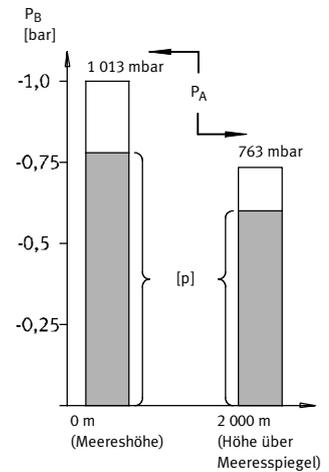
Mit zunehmender Höhe sinkt dieser Luftdruck. Bis zu einer Höhe von 2 000 m sinkt der Druck linear um ca. 12,5 mbar pro 100 m auf 763 mbar ab.

Ein und derselbe Vakuumherzeuger hat zwar immer noch dasselbe Leistungsniveau von 80% Vakuum, allerdings beziehen sich diese 80% auf den Umgebungsdruck, der sich durch die Höhe auf 763 mbar verringert hat. Somit kann dieser Vakuumherzeuger nur noch einen maximalen absoluten Druck von ca. 0,4026 bar (402,6 mbar) erreichen.

Angenommen, man geht mit demselben Vakuumherzeuger noch höher als die bisher 2 000 m über Meereshöhe, um dort Vakuum zu erzeugen bzw. anzuwenden, so würde sich das maximal erreichbare Vakuumniveau bei unverändertem Leistungsniveau von 80% weiterhin verringern, da der Umgebungsdruck in der Atmosphäre weiterhin sinkt.

Auf einer Höhe von ca. 5 500 m über Meereshöhe beträgt der Luftdruck nur noch ca. 50% vom Druckniveau auf Meereshöhe (506 mbar).

Die mögliche Haltekraft eines Vakuumsauggreifers sinkt proportional zum erreichbaren Vakuumwert.



$p =$ Leistung Vakuumherzeuger X
= 80%

Geltende Normen und Richtlinien

Laut Festo Norm FN 942 011 sind für den Bereich Vakuum folgende Normen und Richtlinien festgelegt.

Vakuum:

Alle dieser Norm zugrunde gelegten Vakuumsaugdüsen dieses Systemhandbuchs arbeiten ausschließlich im Grobvakuumbereich. Als Referenzdruck zur Angabe und Berechnung von Druckwerten ist entsprechend der Festo Richtlinie stets der mittlere Luftdruck in Meereshöhe von 1 013,25 mbar anzunehmen.

Skalierungsfaktor:

Bei der Messung der Kenngrößen (Luftverbrauch, Druck, Evakuierungszeit und Saugvermögen) muss mit Schwankungen des Umgebungsdrucks gerechnet werden. Da alle gemessenen Drücke im Versuchslabor Relativdrücke bezogen auf den momentanen Umgebungsdruck sind, bewirken die Schwankungen des Umgebungsdrucks eine gewisse

Streuung der Messergebnisse.

Deshalb werden die Messergebnisse auf den Referenzdruck bezogen. Die Umrechnung geschieht mit Hilfe eines Skalierungsfaktors (S), der nach folgender Gleichung berechnet wird.

$$S = \frac{p_{\text{ref}}}{p_{\text{amb}}}$$

($p_{\text{ref}} = 1\,013\text{ mbar}$)

Beispiel:

Bei einem aktuellen Luftdruck $p_{\text{amb}} = 975\text{ mbar}$ ergibt sich ein Skalierungsfaktor $S = 1,039$. Somit ergibt sich das anzugebende Vakuum bei einem gemessenen Wert von 750 bar (0,75 mbar) absolut zu $P = 780\text{ bar}$ (0,78 mbar).

DIN-Normen, Forschungsberichte und Richtlinien von Festo

DIN 1 314
Druck, Grundbegriffe und Einheiten

DIN 28 401
Bildzeichen (Übersicht)

FB 190
Vakuumrichtlinie-Grundlagen (Forschungsbericht, Festo Forschung, Dr. Berger)

FR 970 003
Strömungstechnische Einheiten und Größen

DIN 28 400
Vakuumtechnik
Teil 1 Allgemeine Benennung
Teil 2 Vakuumpumpen
Teil 3 Vakuummessgeräte
Teil 8 Vakuumsysteme, Komponenten

DIN 28 402
Größen, Formalzeichen und Einheiten (Übersicht)

FR 970 004
Durchflussmessung

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

FESTO

Vakuumerzeuger			
Einleitung			
<p>In einem geschlossenen Raum Vakuum zu erzeugen bedeutet, den Luft- bzw. Gasdruck zu senken. Dazu müssen Gasteilchen aus dem Volumen entfernt bzw. ihr Anteil verringert werden. Im wesentlichen gibt es zwei Verfahren, um dies durchführen zu können:</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Das Gas wird aus dem geschlossenen Raum in einen Außenraum bzw. in die Atmosphäre evakuiert. 2. Das Gas wird innerhalb der Vakuumanlage gebunden, d. h. kondensiert, sorbiert oder chemisch gebunden. 	<p>Es gibt eine Vielzahl von Vakuumerzeugern, die nach den unterschiedlichsten technischen Verfahren bzw. Methoden funktionieren und oft unter dem Oberbegriff „Vakuumpumpen“ zu finden sind. Grundsätzlich sollen hier die Vakuumerzeuger in drei Arten eingeordnet und ihrer Funktionsweise nach unterschieden werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vakuüm-Ejektoren, • Gasbindende Vakuumpumpen, • Gasfördernde Vakuumpumpen. 	<p>Eine direkte Gegenüberstellung dieser Vakuumerzeuger wäre nicht objektiv genug, da sie durch ihren unterschiedlichen technischen Aufbau, ihre Funktionsweise sowie durch ihre Einsatzbereiche und Wirkungsgrade sich grundlegend voneinander unterscheiden. Im Folgenden sollen die genannten Arten von Vakuumerzeugern in ihrer Funktion beschrieben sowie die technischen Merkmale und Vorteile hervorgehoben werden.</p>

Vakuüm-Ejektor – Hohes Vakuum, relativ geringer Volumenstrom			
Allgemein			
<p>Im Vergleich mit den teilweise hoch komplizierten und mechanisch aufwendigen Konstruktionen zur Erzeugung von Vakuum, ist das Funktionsprinzip von Ejektoren denkbar einfach. Dennoch verbirgt sich hinter diesem Prinzip ein enormes Lösungspotential für</p>	<p>die tägliche Praxis. Vakuüm-Ejektoren funktionieren grundsätzlich nach dem Düsenprinzip von Venturi, d. h. die Vakuümeerzeugung erfolgt über rein pneumatisch getriebene Düsen ohne bewegliche Teile. Als besondere Eigenschaft von</p>	<p>Vakuüm-Ejektoren gilt, dass sie bei einem relativ geringen Volumenstrom ein hohes Vakuum bzw. Unterdruck erzeugen können. Es gibt zweierlei Aufbauprinzipien mit unterschiedlichster, oft aufwendiger Ausstattung wie z. B. Ventile, Filter, Schalldämpfer,</p>	<p>Schalter etc. Der entscheidende Teil aber, dort, wo das Vakuum erzeugt wird, funktioniert immer nach dem Venturi-Prinzip.</p>

Funktionsprinzip			
<p>Ein klassischer Ejektor besteht aus einer Strahldüse (Venturi-Düse) und je nach Aufbauprinzip aus mindestens einer Empfängerdüse. Druckluft strömt in den Ejektor ein. Durch die Verengung an der</p>	<p>Strahldüse (Venturi-Düse) beschleunigt die Luft bis zu 5facher Schallgeschwindigkeit, während sie durch die Strahldüse fließt. Zwischen dem Austritt aus der Strahldüse und dem Eintritt in die Empfängerdüse ist ein kleiner Ab-</p>	<p>stand. Durch die expandierte Druckluft aus der Strahldüse entsteht an dem Abstand zur Empfängerdüse eine Sogwirkung, so dass am Ausgang (Vakuüman-schluss) ein Vakuum entsteht.</p>	<p>Einstufiger Ejektor</p>

Vakuum-Ejektor – Hohes Vakuum, relativ geringer Volumenstrom

Aufbauprinzipien

Einstufiger Ejektor:

Im Aufbauprinzip eines einstufigen Ejektors gibt es eine Strahldüse und nur eine Empfängerdüse. Nach der Empfängerdüse wird die Abluft in der Regel in einen Schalldämpfer oder direkt in die Atmosphäre abgeleitet.

Mehrstufiger Ejektor:

Bei diesem Aufbauprinzip gibt es ebenfalls eine Strahldüse. Hinter der ersten Empfängerdüse sind noch weitere Düsenstufen angebracht, die im Verhältnis zum abnehmenden Luftdruck jeweils ei-

nen größeren Düsendurchmesser haben. Somit wird die eingesaugte Luft aus der ersten Kammer, vermischt mit der Druckluft aus der Strahldüse, als Treibstrahl für die weiteren Kammern benutzt.

Am Ende der letzten Empfängerdüse wird die Luft meist auch durch einen Schalldämpfer abgeleitet.

Merkmale

- Absolut wartungs- und verschleißfrei, da keine beweglichen Teile
- Kostengünstig in der Anschaffung
- Kostengünstig in der Energie, da der Ejektor nur bei Gebrauch zugeschaltet wird
- Keine Wärmeentwicklung
- Kompakte Bauweise, kleinste Abmessungen möglich
- Für getaktete Einsatzbereiche
- Reaktionsschnell
- Geringe Leitungslängen zwischen Erzeugung und Einsatz von Vakuum
- Einfacher Einbau, beliebige Einbaulage
- Geringes Gewicht
- Mehrere Funktionen in einem Gerät möglich
- Trockene und gefilterte Druckluft ist vorteilhaft
- Versorgungsanschluss 4 ... 6 bar optimal

Anwendungen

- Automobilindustrie bei der Zuführung von Teilen
- Verpackungindustrie
- Anwendung mit Industrierobotern in allen Branchen
- Verfahrenstechnik
- Förderung von Flüssigkeiten und Schüttgut

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

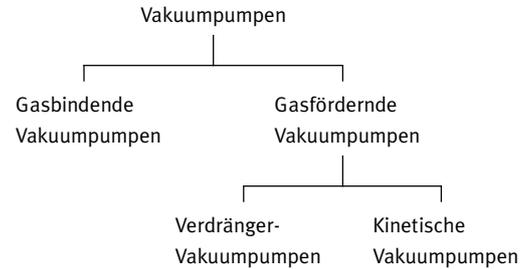
FESTO

Verdränger-Vakuumpumpen/Kinetische Vakuumpumpen

Allgemein

Weitere Komponenten zur Erzeugung von Vakuum sind Vakuumpumpen.

Um die in der Vakuumtechnik verwendeten Pumpenkonstruktionen bzw. Funktionsprinzipien sinnvoll einzuteilen, unterteilt man diese am besten nach ihrer Wirkungsweise.



Gasbindende Vakuumpumpen

Funktionsprinzip

Wie der Name schon sagt, werden in gasbindenden Vakuumpumpen die Gasteilchen nicht nach außen gefördert, sondern im Inneren der

Vakuumanlage in einen flüssigen, einen festen oder einen sorptiven Zustand überführt. Auf diese Weise wird der Gasanteil (Luft) im

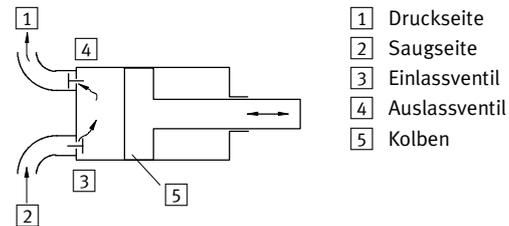
geschlossenen Raum verringert, ein Vakuum entsteht.

Gasfördernde Verdränger-Vakuumpumpen – Hohes Vakuum, geringer Volumenstrom

Funktionsprinzip

Bei Verdränger-Vakuumpumpen strömt das Gas (Luft) freiwillig in einen sich vergrößernden Raum, wird dann mechanisch abgesperrt, verdichtet und ausgestoßen. Das Hauptmerkmal von Vakuumpumpen dieser Art liegt darin, dass ein sehr hohes Vakuum bei nur geringen Volumenströmen erzielt wird.

Die Abbildung rechts zeigt vereinfacht, wie das Prinzip einer Verdränger-Vakuumpumpe funktioniert. Es gibt noch eine Vielzahl weiterer konstruktiv sehr unterschiedlicher Lösungen, doch das Funktionsprinzip bleibt bei allen Pumpen unverändert gleich.



- 1 Druckseite
- 2 Saugseite
- 3 Einlassventil
- 4 Auslassventil
- 5 Kolben

Merkmale

- Hohes Vakuum von bis zu 98% erreichbar
- Geringer Wartungsaufwand
- Meist Beschränkungen von Einbaulagen
- Größere Abmessungen

Anwendungen

- Verpackungsmaschinen
- Manuelle Vakuumhandhabung
- Spannvorrichtungen
- Forschung

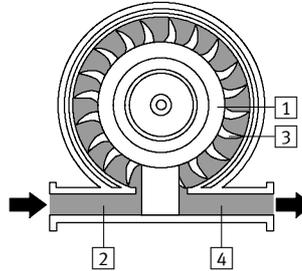
Gasfördernde kinetische Vakuumpumpen – Geringes Vakuum, hoher Volumenstrom

Funktionsprinzip

Bei kinetischen Vakuumpumpen werden bei der Evakuierung die Gasteilchen (Luft) durch geeignete zusätzliche Einwirkung zu einer Strömung in Förderrichtung gezwungen.

Das Hauptmerkmal dieser Vakuumpumpen ist, dass ein nur relativ geringes Vakuum erzeugt werden kann. Allerdings werden gleichzeitig sehr hohe Volumenströme (hohes Saugvermögen) erreicht.

Vakuumgebläse zählen zu den kinetischen Vakuumpumpen. Diese Vakuumherzeuger arbeiten nach dem Impulsprinzip, d. h. bei der Übertragung von kinetischer Energie durch ein rotierendes Laufrad **1** auf die Luft, wird auf der Saugseite **2** die Luft durch auf dem Laufrad angebrachte Schaufeln **3** mitgerissen und verdichtet **4**.



Auch Vakuumverdichter sind kinetische Vakuumpumpen mit ähnlichen Eigenschaften. Die Saugluft wird mehrstufig pulsationsarm durch Zentrifugalkraft in Schaufelkammern eines Laufrades verdichtet. Auch hier können wie beim Gebläse hohe Saugvolumenströme bewältigt werden, mit begrenzter Vakuumleistung.

Merkmale

Vakuumgebläse und Verdichter

- Absaugen von großen Volumen in sehr kurzer Zeit
- Hoher Wartungsaufwand
- Nur geringe Vakuumleistung möglich

Anwendungen

Vakuumgebläse

- Handhabung von sehr porösen Werkstoffen wie z. B. Spanplatten oder Kartons etc.
- Wenn große Saugvolumen pro Zeiteinheit wichtig sind

Verdichter

- Bei präzise definierten industriellen Anwendungen

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

FESTO

Sinnvoller Einsatz von Vakuum

Das Handhaben ist eine Teilfunktion des Materialflusses und gliedert sich in die Bereiche Speichern, Mengen verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein von bestimmten geometrischen Körpern (Einzelteile

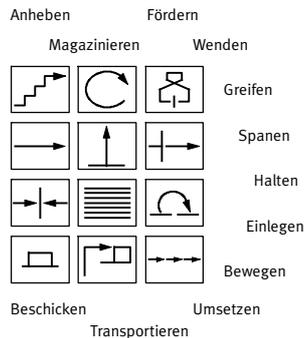
oder Baugruppen). Einrichtungen der Handhabungstechnik sind u. a. Komponenten und Systeme der Zuführtechnik, Einlegegeräte, Manipulatoren und Roboter. Die Art und Weise beim Handhaben von Teilen bestimmt heute maßgeblich die Produktivität in

automatisierten Fertigungs- und Montageprozessen. Die Vakuumtechnik ist heute ein wichtiger Teil dieser Handhabungstechnik und ist in vielen Industrien und Anwendungsbereichen, in denen sie zum Einsatz kommt, nicht mehr wegzudenken.

Die Vakuumtechnik hat sich in der Handhabung unterschiedlichster Materialien und Teile vielfach bewährt und damit völlig neue Perspektiven und Lösungsmöglichkeiten für die Handhabungstechnik geschaffen.

Handlungsaufgaben

Folgende Stichworte und Symbole sollen verdeutlichen, welchen Stellenwert bzw. welches Aufgabenspektrum die Vakuumtechnik in der Handhabungstechnik übernimmt.



Alle diese Aufgaben multiplizieren sich zu nahezu unendlich vielen Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie.

Industrielle Einsatzgebiete der Vakuumtechnologie sind z. B.:

- Sondermaschinenbau
- Verpackungs-Industrie
- Lebensmittel-Industrie
- Holzverarbeitende Industrie
- Blechverarbeitende Industrie
- Automobil-Industrie
- Elektro-Industrie

Allgemein

Die Vakuumtechnik wird im allgemeinen gerne dem Oberbegriff Greifertechnologie zugeordnet.

In der Handhabungstechnik gibt es eine Vielzahl von Anwendungen, in denen die mechanische Greifertechnologie zum Einsatz kommt und auch sicherlich von Vorteil ist.



Allerdings gibt es auch viele Anwendungen, bei der diese Technologie an ihre Grenzen kommt.

Oft genug findet dann die Vakuumtechnik ihre Anwendung und eröffnet für die Industrie völlig neue Konzepte und Möglichkeiten.



Vorteile

Vakuum in der Handhabungstechnik bedeutet:

- Sanftes Handling empfindlicher Teile

- Einfache Komponenten- bzw. Systemauslegung
- Kompakter und platzsparender Aufbau

- Geringes Gewicht, d. h. geeignet für hohe dynamische Bewegungen
- Schnelle Taktzeiten möglich

- Kostengünstig
- Niedriger Wartungsaufwand
- Vielen Anforderungsbedingungen anpassbar

Wichtige Faktoren

Ob Vakuumtechnik oder eine andere Technologie der Handhabungstechnik zum Einsatz kommt, hängt von vielen Faktoren ab. Einige wichtige sind wie folgt beschrieben.

- Gewicht des Werkstückes
- Temperatur des Werkstückes bzw. dessen Oberfläche
- Geschwindigkeit pro Zeiteinheit zur Durchführung der Zyklen
- Form der Oberfläche der Werkstücke
- Rauheit der Oberfläche der Werkstücke
- Hub- und Transportwege beim Handling

Eine große Variantenvielfalt unter den Vakuumkomponenten ermöglicht es, für verschiedenste Anwendungen, unter Berücksichtigung der oben genannten Faktoren, Komponenten mit den gewünschten Produkteigenschaften wie z. B. Hitzebeständigkeit, Geschwindigkeit, Saugstärke etc. auszuwählen.

Zur genauen Auswahl bzw. Bestimmung von Vakuumkomponenten für jeweilige Anwendungen bietet Festo ein Softwaretool als Auswahlhilfe.

Ein- und mehrstufige Ejektoren

Allgemein

Kommt die Vakuumtechnik zur Anwendung, so findet man heutzutage vermehrt und überwiegend Vakuum-Ejektoren im Einsatz.

Natürlich gibt es noch viele Spezialanwendungen, bei denen Vakuumpumpen nach wie vor unersetzlich sind, doch oftmals sprechen in der Handhabungstechnik die Argumente für den Einsatz von Ejektoren. Die wich-

tigsten hierfür sind ihre niedrigen Anschaffungskosten, der geringe Wartungsaufwand und der flexible Einsatz im Vergleich zu anderen Vakuumerzeugern. Wie schon im Abschnitt „Komponenten der Vakuumerzeugung“

beschrieben → 2, gibt es zwei unterschiedliche Aufbauprinzipien von Vakuum-Ejektoren. Das Funktionsprinzip nach Venturi ist bei beiden aber grundsätzlich gleich.

Funktionsprinzip

Wie schon erwähnt, funktionieren alle Ejektoren nach dem Funktionsprinzip von Venturi.

Das Prinzip umfasst eine Strahldüse (Laval-Düse) und je nach

Aufbauprinzip mindestens eine Empfängerdüse.

Aufbauprinzip

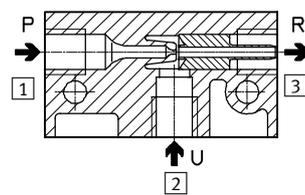
Einstufiger Ejektor:

Dieses Ejektor-Prinzip beinhaltet eine Strahldüse (Laval-Düse) und eine Empfängerdüse.

Das Absaugen der Umgebungsluft bzw. das Erzeugen von Vakuum funktioniert somit innerhalb einer Kammer und dem Abstand zwischen Strahl- und Empfängerdüse.

In der Regel wird die Druckluft bzw. die angesaugte Umgebungsluft direkt nach der Empfängerdüse über einen direkt nachgeschalteten Schalldämpfer in die Atmosphäre (Umgebung) abgeleitet.

Einstufiger Ejektor:



- 1 Druckluftanschluss/ Strahldüse
- 2 Vakuum/Saugeranschluss
- 3 Abluft/Empfängerdüse

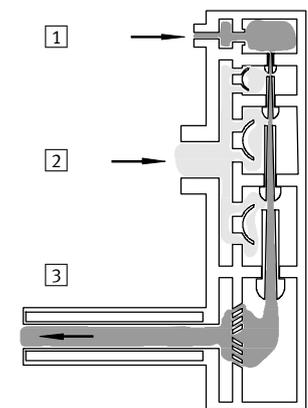
Mehrstufiger Ejektor

Wie schon beim Prinzip des einstufigen Ejektors, beinhaltet dieses Aufbauprinzip ebenfalls eine Strahldüse (Laval-Düse), in der die einströmende Druckluft auf bis zu 5-fache Schallgeschwindigkeit beschleunigt wird und im Anschluss daran eine Empfängerdüse.

Hinter der ersten Empfängerdüse sind noch weitere Düsenstufen angebracht, die im Verhältnis zum abnehmenden Luftdruck jeweils einen größeren Düsendurchmesser haben. Somit wird die eingesaugte Luft aus der ersten Kammer, vermischt mit der Druckluft aus der Strahldüse, als Treibstrahl für die weiteren Kammern benutzt.

Nach der letzten Empfängerdüse wird die Abluft meist auch durch einen nachgeschalteten Schalldämpfer in die Atmosphäre (Umgebung) abgeleitet.

Mehrstufiger Ejektor



- 1 Druckluftanschluss/ Strahldüse
- 2 Vakuum/Saugeranschluss
- 3 Abluft/Empfängerdüse

Ein- und mehrstufige Ejektoren

Grundlegendes

Im direkten Vergleich der Aufbau- prinzipien von ein- und mehrstu- figen Ejektoren gibt es oft Diskus- sionen über Vor- und Nachteile der beiden Prinzipien. Hersteller

von Vakuum-Ejektoren setzen im Regelfall auf eines der beiden Aufbauprinzipien und somit ist eine objektive Argumentation oft- mals leider nicht gegeben.

Objektiv betrachtet kommt es in der Handhabungstechnik mit Vakuum auf einige wenige wich- tige Größen an, nach denen die Leistungsfähigkeit eines Vakuum-

erzeugers gemessen oder bewer- tet werden kann.

Wirkungsgrad η in Abhängigkeit vom Vakuum Δp_u

Evakuierungszeit = Zeit (s) um ein bestimmtes Vakuum zu errei- chen.

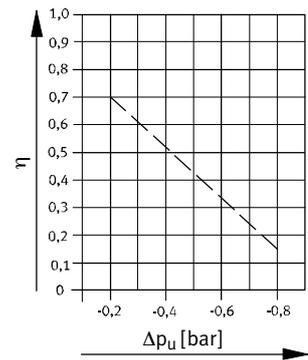
Luftverbrauch = Luftverbrauch (l/min) des Ejektors, um ein be- stimmtes Vakuum zu erzeugen.

Aus diesen Größen, Evakuie- rungszeit, Luftverbrauch sowie dem Volumen in Abhängigkeit vom Vakuum, ergibt sich eine For- mel, mit der der Wirkungsgrad ei- ner Saugdüse ermittelt werden kann. Dies ist wohl das objek- tivste Kriterium, um einen Leis- tungsvergleich von Saugdüsen unterschiedlichster Bauart be- werten zu können.

$$\eta(\Delta p_u) = \frac{1}{1 + \frac{t(\Delta p_u) \times Q}{V \times 60s/min}}$$

$\eta(\Delta p_u)$ = Wirkungsgrad der Vakuum-Saugdüse bezogen auf den Unterdruck

$t(\Delta p_u)$ = Evakuierungszeit [s]
 Q = Luftverbrauch [l/min]
 V = zu evakuierendes Volumen (Normvolu- men) [l]



In der Praxis besteht die Aufgabe einer Saugdüse darin, in mög- lichst kurzer Zeit ein bestimmtes Vakuum zu erzeugen und dabei möglichst wenig Luft (Energie) zu verbrauchen.

Trugschluss

Saugvolumenstrom = Saugluft- menge (l/min) die ein Ejektor an- saugen kann.

Irrtümlicherweise wird in der Pra- xis die Leistung eines Ejektors oft auch am Saugvolumenstrom ge- messen. Der Trugschluss besteht darin, dass der Saugvolumen- strom oft bei Atmosphärendruck gemessen wird und das Ergebnis dann als Leistungsangabe des

Ejektors verwendet wird. Aller- dings fällt der Saugvolumenstrom mit zunehmendem Vakuum pro- gressiv nach unten ab, d. h. aus einem hohen Saugvolumenstrom resultiert nicht unbedingt eine kurze Evakuierungszeit.

Deshalb sind Leistungsvergleiche von Vakuum-Ejektoren anhand von Saugvolumenstrom nur sehr bedingt aussagefähig. Ausgenom- men, man vergleicht die Saug- volumenströme der Probanden bei gleichem Vakuumniveau.

Ein- und mehrstufige Ejektoren

Vergleich

Ziel dieses Vergleiches von einstufigen und mehrstufigen Ejektoren ist es, Größen oder Kriterien zu bewerten, auf die es in der Praxis ankommt und an denen ihre Leistungsfähigkeit gemessen werden kann.

- Evakuierungszeit
- Luftverbrauch
- Wirkungsgrad

Natürlich spielen Größen wie Schallpegel, Belüftungszeit oder erreichbares Vakuum auch eine wichtige Rolle.

Im Praxisvergleich einstufig – mehrstufig ergeben sich folgende allgemeine Erkenntnisse, die im Vorfeld angeführt werden sollen.

Allgemeine Erkenntnisse

Größen/Kriterien	Einstufig	Mehrstufig
Saugvolumenstrom	durchschnittlich	hoch bei niedrigem Vakuumniveau bis ca. 50 %
Evakuierungszeit	sehr kurz ¹⁾ im höheren Vakuumbereich ab 30 ... 50 %	sehr kurz ¹⁾ im niedrigeren Vakuumbereich bis 30 ... 50 %
Anschaffungskosten	gering	relativ hoch
Geräuschentwicklung	relativ hoch	gering

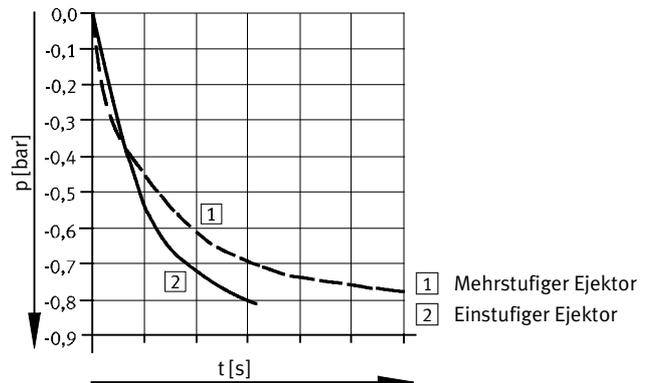
1) Siehe Diagramm unten

Evakuierungszeit

Generell kann der mehrstufige Ejektor bis zu einem Druckbereich von ca. 30 ... 50% Vakuum diesen Druck schneller erzeugen bzw. das Volumen schneller evakuieren als der einstufige Ejektor. Im Regelfall ist aber in der Praxis ein Druck von -0,4 ... -0,8 bar bzw. ein Vakuum zwischen 40 und 80% erforderlich.

Aus dem schematischen Diagramm, in dem dieser Vergleich prinzipiell dargestellt ist, geht deutlich hervor, dass einstufige Ejektoren hierbei klare Vorteile haben. Je höher das Vakuumniveau, desto mehr Zeitanteil benötigt der mehrstufige Ejektor, dieses zu erzeugen.

Betriebsdruck p in Abhängigkeit von der Evakuierungszeit t



Luftverbrauch

Mehrstufige Ejektoren haben durchschnittlich betrachtet einen viel geringeren Luftverbrauch und somit niedrigeren Energieverbrauch als einstufige Ejektoren,

was einen klaren Vorteil für mehrstufige Ejektoren bedeuten würde. Betrachtet man allerdings diese Erkenntnis in Verbindung mit der

Evakuierungszeit, so relativiert sich dieser Vorteil. Denn der Luftverbrauch ist zwar geringer, doch zur gleichen Zeit ist die Evakuierungszeit höher. Dies schränkt

den eigentlichen Vorteil der Energieeinsparung erheblich ein.

Saugvolumenstrom

Einstufige Ejektoren haben im Vergleich zum mehrstufigen Prinzip einen niedrigeren Saugvolumenstrom. Somit können mehrstufige Ejektoren im niedrigen

Vakuumbereich von ca. 30 ... 50% bei gleicher Zeit höhere Volumen absaugen. Mit Zunahme des Vakuumniveaus (ab ca. 30 ... 50%) fällt diese pro-

gressive Kurve bei mehrstufigen Ejektoren allerdings stark ab (siehe Diagramm), d. h. mit Zunahme des Drucks fällt dieser anfängliche Vorteil eines höheren

Saugvolumens unter die Werte von einstufigen Ejektoren.

Ein- und mehrstufige Ejektoren

Schallpegel, Vakuumniveau und Belüftungszeit

Im Vergleich haben einstufige Ejektoren eine relativ hohe Geräuschentwicklung. Dadurch, dass die Druckluft bei mehrstufigen Ejektoren durch die hintereinander angeordneten Düsenstufen

verlangsamt wird, bevor sie in „abgeschwächter“ Form in die Atmosphäre gelangt, ist der Schallpegel dementsprechend niedriger als bei einstufigen Ejektoren. Allerdings wird hier mit

entsprechenden Schalldämpfern viel entgegengewirkt. Beide Aufbauprinzipien erreichen das gleiche Vakuumniveau, obwohl einstufige Ejektoren dies in kürzerer Zeit erreichen.

Kaum Unterschiede sind bei der Belüftungszeit zu beobachten, obwohl ein einstufiger Ejektor weniger Volumen zu belüften, und hier einen minimalen Zeitvorsprung hat.

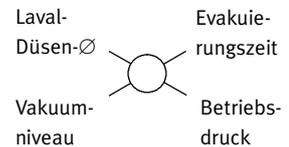
Zusammenfassung

Die Ursache für das etwas schlechtere Abschneiden in der Evakuierungszeit des mehrstufigen Ejektors liegt daran, dass die zweite und weitere Düsenstufen zwar ein hohes Saugvermögen erzeugen, doch werden diese schon bei relativ geringem Vakuumniveau ausgekoppelt. Bei höherem Druck saugt somit nur noch die erste Düsenstufe, die einen we-

sentlich schlechteren Wirkungsgrad hat als bei einem einstufigen Ejektor. Es ist allerdings zu bemerken, dass diese Erkenntnisse allgemein zu betrachten sind und somit auch deren Aussagekraft nur als Orientierungshilfe dienen kann. Unabhängig vom Aufbauprinzip erzielt man unterschiedliche Ergebnisse bei Veränderung von Ausgangsgrößen, die in einer

Wechselwirkung zueinander stehen. Bei Vergrößerung des Laval-Düsen-Durchmessers bei gleichem Betriebsdruck vergrößert sich das Saugvolumen, doch gleichzeitig verlängert sich die Evakuierungszeit und im Extremfall wird das gewünschte Vakuum nicht mehr erreicht, ohne den Betriebsdruck zu erhöhen.

Anhand dieses Beispiels wird deutlich, wie alle diese Größen voneinander abhängig sind. Wird eine Größe verändert, beeinflusst dies auch die anderen Größen.



Fazit

Der Vergleich macht deutlich, dass eine objektive Aussage über Pro und Kontra der beiden Funktionsprinzipien sehr schwierig zu treffen ist.

Ganz zu schweigen davon, eines dieser Funktionsprinzipien zu bevorzugen oder als „Testsieger“ hervorzuheben. Im Grunde haben beide Funktionsprinzipien ihre

Vorteile in ganz bestimmten Bereichen und genießen somit ihre Daseinsberechtigung. Außerdem wird deutlich, wie sich kleine technische Veränderungen auf die Ejektoren auswirken können und sich beide Funktionsprinzipien ihrer Anwendung entsprechend optimieren lassen (z. B. Variation von Laval- oder

Empfängerdüsen-Durchmesser). Beide Funktionsprinzipien können somit Wirkungsgrade erzielen oder Eigenschaften besitzen, die sich jeglicher Allgemeinaussage entziehen. Abschließend ist zu sagen, dass der einstufige Ejektor seine Vorteile in Anwendungen mit durchschnittlichem oder höherem Druck (Vakuum) hat. Der

einfache Aufbau macht dieses Funktionsprinzip kostengünstiger und in den Abmaßen handlicher als das mehrstufige Prinzip. Der mehrstufige Ejektor wiederum hat seine Vorteile meist dort, wo sehr schnell relativ niedriges Vakuum (bis ca. -0,3 bar) erzielt werden soll und dabei Energiekosten eine Rolle spielen.

Energiekostenvergleich Vakuum-Ejektor/Vakuumpumpe (elektrisch)

Aus dem Bewusstsein heraus, dass Energie knapp, wertvoll und vor allem teuer ist, spielen bei der Auswahl eines geeigneten Vakuumsystems Energiekosten eine wichtige Rolle.

Im ersten Augenblick kommt es vielleicht nicht unbedingt in den Sinn, sich Gedanken über den Luftverbrauch eines Vakuumsystems zu machen. Doch darf

der Energieeinsatz, der notwendig ist, um einen pneumatischen Vakuum-Ejektor mit Druckluft zu betreiben, nicht außer Acht gelassen werden. Deshalb gilt die Aussage: Luft ist teuer.

Bei elektrisch angetriebenen Vakuumpumpen dagegen lässt sich der Energieaufwand anhand des Stromverbrauchs viel leichter

messen und somit auch monetär bewerten.

Fakt ist: Um aus atmosphärischer Luft Druckluft zu erzeugen, bei Betrachtung aller Kosten wie Material-, Abschreibungs-, Lohnkosten etc., bei Stromtarifen (Industrie) von 0,10 €/kWh, wird ein Kostenaufwand von derzeit ca. 0,02 € pro 1 m³ Volumen auf 7 bar (üblicher Versorgungsdruck)

erforderlich. Dieser Kostenaufwand gilt im Niederdruckbereich bis 10 bar. Im Hochdruckbereich (10 ... 20 bar) erhöhen sich die Kosten für Druckluft um ca. 100%.

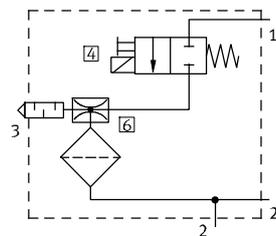
Vorab sollen einige Kriterien von Vakuum-Ejektor sowie Vakuumpumpen erwähnt werden, die bei einem Vergleich mit berücksichtigt werden müssen.

Vakuum-Ejektor

Pro

- Energieverbrauch nur bei Bedarf.
Druckluft bzw. Energie wird nur während dem Ansaugvorgang und „Werkstückhandling“ in einem Arbeitszyklus verbraucht. Während der übrigen Zeit (Abgabe, Rückfahrt) ist die Vakuumdüse ausgeschaltet. Ejektoren verfügen über schnelle Reaktionszeiten (Start- und Stoppzeiten) und können deshalb, wenn kein Vakuum notwendig ist, abgeschaltet werden (→ Schaltbild 1).
- Vakuum-Ejektoren sind bis auf den Vorfilter völlig wartungsfrei und besitzen keine beweglichen Teile.

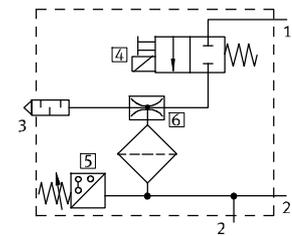
Schaltbild 1



- 1 = Druckluftanschluss
- 2 = Saugeranschluss
- 3 = Abluftanschluss
- 4] 2/2-Wegeventil
- 6] Rückschlagventil

- Energiesparfunktion:
Viele Ejektoren (Kompakt-Ejektoren) verfügen über diese Funktion. Druckluft wird nur zum Erzeugen von Vakuum verbraucht. Ist das Vakuumniveau erreicht, schaltet der Ejektor ab. Das Vakuum wird mittels Ventilen bzw. Schaltern beibehalten und überwacht (→ Schaltbild 2).
Energiesparfunktion =
4] 2/2-Wegeventil +
5] Schalter +
6] Rückschlagventil
- Ihr geringes Gewicht-/Masse-Verhältnis und ihr geringes Bauvolumen sowie die beliebige Einbaulage sind zu erwähnen.
- Dabei kann ein relativ hohes Vakuum von bis zu 85% erreicht werden.

Schaltbild 2



- 1 = Druckluftanschluss
- 2 = Saugeranschluss
- 3 = Abluftanschluss
- 4] 2/2-Wegeventil
- 5] Schalter
- 6] Rückschlagventil

Kontra

- Bei Festo Ejektor fällt das Saugvolumen von ca. 16 m³/Stunden relativ begrenzt aus.
- Ein hoher Druckluftverbrauch pro m³ Vakuum erhöht die Energiekosten drastisch. Allerdings werden diese durch Luft-/Energie-Sparfunktionen relativiert.

Grundlagen der Vakuumentchnik

Einführung

Vakuumpumpe

Pro

- Mit bestimmten Bauweisen kann ein sehr hohes Vakuum (bis 10^{-4} mbar = 99,99999%) erreicht werden.
- Hohes Saugvolumen von bis zu $1\,200\text{ m}^3/\text{Std.}$ möglich.

Kontra

- Elektromechanische Vakuumpumpen sind fast immer im Dauerbetrieb, der Vakuumbedarf wird über Ventile geregelt. Dadurch ist der Stromverbrauch und somit die Energiekosten sehr hoch.
- Hohe Anschaffungskosten und permanente Wartungskosten.
- Großes Gewicht-/Masse-Verhältnis und großes Bauvolumen sowie vorgegebene Einbaulagen.

Energiekostenvergleich/Rechenbeispiel

Im Vergleich steht ein Vakuum-Ejektor (pneumatisch), vergleichsweise mit und ohne Luftsparfunktion ausgestattet und dazu als Gegenüber eine in der Leistung vergleichbare Vakuumpumpe (elektrisch).
An einem Rechenbeispiel soll ein Kosten- bzw. Energiekostenvergleich bezogen auf einen Zeitraum von einem Jahr erstellt werden.

- Als Strompreis wird von Industrietarifen ausgegangen (0,10 €/kWh).
- Die Kosten für Druckluft beziehen sich, wie bereits erwähnt, auf 1 m^3 Volumen mit 7 bar Druck. Dabei sind alle Kosten wie Material-, Abschreibungs-, Lohnkosten etc. in der Berechnung berücksichtigt ($0,02\text{ €/m}^3$).
- Weitere gegebene Zahlenwerte, wie z. B. Zeitangaben, ergeben sich aus dem Anwendungsaufbau.

Strompreis [€/kWh]	Druckluftkosten [€]	Anlagekapazität [kW]	Bemerkung
0,05	0,02	ca. 1 100	Großanlage
0,10	0,02	ca. 1 100	Großanlage
0,10	0,03	ca. 20	Kleinanlage

Grundlagen der Vakuumtechnik

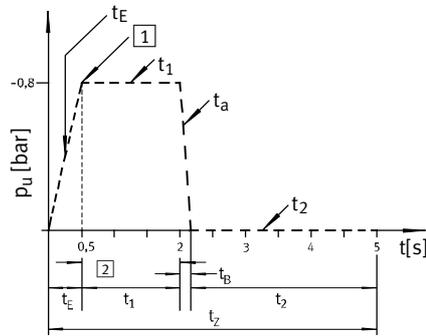
Einführung

Berechnungsgrundlagen

Arbeitszyklus Ejektor

- Ejektor mit Luftsparfunktion: Luftverbrauch (Energieverbrauch) nur für die Dauer der Aufnahme (Abholung) des Werkstücks (= 0,5 s).
- Ejektor ohne Luftsparfunktion: Luftverbrauch (Energieverbrauch) für Aufnahme (Abholung) und Transport des Werkstücks (= 2 s).
- Vakuumpumpe: Energieverbrauch für die gesamte Dauer des Arbeitszyklus, da die Pumpe normalerweise nicht abschaltet (= 5 s).

In der Abbildung links ist der Arbeitszyklus eines Vakuumsystems grafisch dargestellt. Die einzelnen Arbeitsschritte des Systems sind in zeitliche Sektoren unterteilt. Je nach Vakuumerzeuger kann dessen zeitlicher Anteil den Arbeitsschritten zugeordnet werden.



- t_E = Evakuierungszeit
- t_1 = Transport
- t_a = Abgabe
- t_2 = Rückgabe
- 1 = Abholung
- 2 = eingesparte Zeit

Größen/Kriterien	Gegebene Zahlenwerte	
Anschaffungskosten Vakuumpumpe	[€]	715
Anschaffungskosten Ejektor	[€]	337
Wartungskosten/Jahr Vakuumpumpe	[€]	306
Anzahl Betriebstage/Jahr		250
Anzahl Betriebsstunden/Tag		16
Zeit pro Arbeitszyklus	[s]	5,0
Zeitanteil Pumpe EIN	[s]	5,0
Zeitanteil Ejektor EIN ¹⁾	[s]	2,0
Zeitanteil Ejektor EIN ²⁾	[s]	0,5
Preis pro kWh (Industrietarif)	[€]	0,10
Preis pro m ³ Druckluft auf 7 bar	[€]	0,02
Versorgungsdruck Ejektor	[bar]	6
Energieeinsatz zur Druckluftherzeugung (1m ³ bei p = 7 bar)	[kWh/m ³]	0,095

1) Ohne Luftsparfunktion
2) Mit Luftsparfunktion

Allgemeine Berechnungen

Für den Energiekostenvergleich der beiden Vakuumerzeuger sind im Vorfeld folgende Berechnungen notwendig:

- Anzahl Produkte pro Jahr (Stunden)
Formel:
Gesamte Betriebszeit (s)/Zeit pro Arbeitszyklus (s)
= $250 \times 16 \times 3600 / 5$
= 2 880 000 Stunden
- Anteil Pumpenbetrieb am Arbeitszyklus (%)
Formel:
Zeitanteil Pumpe EIN (s)/Zeit pro Arbeitszyklus (s) x 100
= $5 / 5 \times 100$
= 100 %
- Anteil Ejektorbetrieb ohne Luftsparfunktion am Arbeitszyklus (%)
Formel:
Zeitanteil Ejektor EIN¹⁾ (s)/Zeit pro Arbeitszyklus (s) x 100
= $2 / 5 \times 100$
= 40 %
- Anteil Ejektorbetrieb mit Luftsparfunktion am Arbeitszyklus (%)
Formel:
Zeitanteil Ejektor EIN²⁾ (s)/Zeit pro Arbeitszyklus (s) x 100
= $0,5 / 5 \times 100$
= 4 %

1) Ohne Luftsparfunktion
2) Mit Luftsparfunktion

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Berechnung Vakuum-Ejektor

Aus den Berechnungen des Vakuum-Ejektors mit und ohne Luftsparfunktion ergeben sich folgende Teilergebnisse:

(Luftverbrauch bei P = 6 bar:
505 l/min)

- Betriebszeit pro Jahr
Formel:
Anzahl Produkte (Stück) x Zeitanteil Ejektor pro Stück (s)
2 880 000 Stück x 2 s
1) = 5 760 000 s (96 000 min)
2) = 1 440 000 s (24 000 min)
- Luftverbrauch pro Jahr
Formel:
Betriebszeit pro Jahr (min) /
Luftverbrauch (l/min)
96 000 min / 505 l/min
1) = 48 480 m³
2) = 12 120 m³
- Energiekosten pro Jahr
Formel:
Luftverbrauch (m³)
x Preis pro m³ Druckluft (€)
48 480 (12.120) m³ x 0,02 €
1) = 969,60 €
2) = 242,40 €

Größen/Kriterien		Gegebene Zahlenwerte
Luftverbrauch bei P = 6 bar	[l/min]	505
Gesamter Luftverbrauch pro Jahr bei P = 6 bar ¹⁾	[m ³]	48 480
Gesamter Luftverbrauch pro Jahr bei P = 6 bar ²⁾	[m ³]	12 120
Lufteinsparung pro Jahr ²⁾	[m ³]	36 360
Lufteinsparung pro Jahr ²⁾	[%]	75
Energiekosten pro Jahr ¹⁾	[€]	969,60
Energiekosten pro Jahr ²⁾	[€]	242,40
Energieeinsparung pro Jahr ²⁾	[€]	727,20

1) Ohne Luftsparfunktion

2) Mit Luftsparfunktion

Berechnung Vakuumpumpe elektrisch

Aus den Berechnungen der Vakuumpumpe ergeben sich folgende Teilergebnisse:

- Betriebszeit pro Jahr
Formel:
Betriebsstunden pro Tag
x Betriebsstage pro Jahr
16 Stunden x 250
= 4 000 Stunden
- Energieverbrauch pro Jahr
Formel:
Betriebszeit pro Jahr
x Energieverbrauch pro Stunde
4 000 Stunden x 0,55 kW
= 2 200 kWh
- Energiekosten pro Jahr
Formel:
Energieverbrauch pro Jahr
x Kosten pro kWh
2 200 kWh x 0,10 €
= 220 €

Größen/Kriterien		Gegebene Zahlenwerte
Energieverbrauch/Betriebsstunde	[kWh]	0,55
Energieverbrauch/Jahr	[kWh]	2 200
Energiekosten/Jahr	[€]	220

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Kostenvergleich Vakuum-Ejektor und Vakuumpumpe

Die Kosten des Vakuumsystems setzen sich aus drei Kostenarten zusammen:

- Investitionskosten
- Wartungskosten
- Energiekosten

Investitionskosten sind einmalig, dagegen sind Wartungs- und Energiekosten jährlich gerechnet.

Ergebnis

Der direkte Kostenvergleich zeigt, dass die Vakuumpumpe mit den Energiekosten alleine gerechnet am niedrigsten liegt, dicht gefolgt von dem Ejektor mit Luftsparfunktion.

Der Ejektor ohne Luftsparfunktion hat deutlich höhere Energiekosten als die anderen Vakuumsysteme. Berücksichtigt man in

der Rechnung auch Wartungs- und Investitionskosten, so relativiert sich der Vorteil der Vakuumpumpe in den Energiekosten.

Kostenart		Vakuumpumpe	Ejektor ohne Luftsparfunktion	Ejektor mit Luftsparfunktion
Investition	[€]	715	337	337
Wartung ¹⁾	[€]	306	–	–
Energie ¹⁾	[€]	220	969,60	242,40

1) Jährlich, bei Vakuumpumpe nach ca. 4 000 bis 6 000 Stunden.

Fazit

Anhand des Rechenbeispiels wird deutlich, dass Ejektoren durchaus ihre Daseinsberechtigung haben. Die hohen Investitionskosten sowie die durch den Dauereinsatz und Verschleißteile hervorgerufene

nen jährlichen Wartungskosten bei Vakuumpumpen bestätigen diese Aussage. Zwar hat der Einsatz von Ejektoren einen höheren Energieeinsatz zur Folge, doch ihre einfache Bau-

weise hält Anschaffungs- und Wartungskosten minimal. Natürlich gibt es viele Anwendungsbereiche, die von Vakuumpumpen als Vakuumsystem beherrscht

sind und in denen Ejektoren auch nicht ihre Anwendung finden. In der Handhabungstechnik allerdings sind diese Aussagen völlig unbegründet.

Leckage in Vakuumsystemen

Der Idealfall bei Vakuumanwendungen in der Handhabungstechnik ist, wenn beim Handling die Werkstückoberflächen, an denen die Vakuumsauger aufliegen müssen, glatt und dicht sind. An solchen Oberflächen kann ein Vakuumsauger vollständig aufliegen.

Wird Vakuum erzeugt, kann die Dichtlippe des Saugers das System gegen atmosphärische Luft von außen völlig verschließen. Man spricht von einem dichten System. Mit zunehmendem Vakuumniveau im System gegenüber dem Atmosphärendruck von außen steigt die Haltekraft des Sauggreifers am Werkstück.

Allerdings sind diese idealen Oberflächeneigenschaften bei den zu bewegenden Werkstücken nicht immer gegeben. Oft sind die Materialien luftdurchlässig (z. B. Papierbögen) oder sehr rau und uneben.

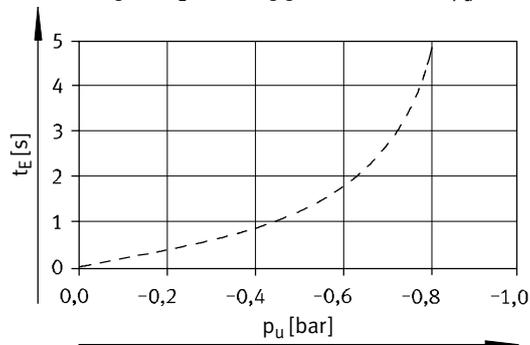
Bei diesen Anwendungen können die Vakuumsauggreifer das System gegenüber der atmosphärischen Luft nicht völlig abdichten. Somit tritt bei der Vakuumerzeugung ständig atmosphärische Luft in das System ein, man spricht von leckenden Systemen.

Dichte Systeme

In der Vakuumtechnik ist die Leistung des Vakuum-Erzeugers bei der Handhabung von dichtem Material unter anderem davon abhängig, wie schnell das System ein gewisses Vakuum erzeugen kann. Diese Leistungsgröße wird als Evakuierungszeit des Vakuum-Erzeugers bezeichnet.

Beim Evakuieren eines bestimmten Volumens verläuft die Zeit-/Druck-Kurve proportional nach oben, d. h. je höher das Vakuum ist, desto stärker lässt das Saugvermögen eines Vakuumerzeugers nach und desto länger ist der Zeitraum, ein noch höheres Vakuum zu erzielen.

Evakuierungszeit t_E in Abhängigkeit vom Vakuum p_u



Undichte Systeme

Bei der Handhabung von porösen Werkstoffen (leckende Systeme) gelten andere Voraussetzungen. Um das gewünschte Vakuumniveau zu erreichen bzw. aufrecht zu erhalten, muss der Vakuum-

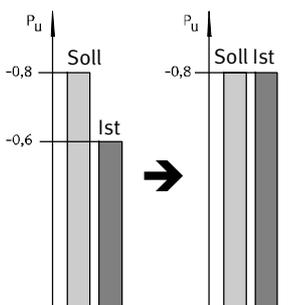
erzeuger in der Lage sein, die ständig eintretende Luft (Leckluft) abtransportieren zu können. Das maximal erreichbare Vakuum, das ein Vakuumerzeuger herstellen kann, wird im Normalfall bei

idealen Bedingungen (dichtes System) gemessen. Die eintretende Leckluft verhindert aber in diesem Fall, dass der Vakuumerzeuger auf sein maximales Leistungsniveau kommt bzw. dies erreichen

kann. Um die Leckluftmenge festzustellen, empfiehlt es sich einen Test durchzuführen (→ 27, „Auswahlhilfe von Vakuumerzeuger bei Leckfluss“).

Abhilfe

Generell gibt es zwei Möglichkeiten, um das Vakuumniveau in leckenden Systemen zu optimieren bzw. zu erhöhen.



Möglichkeit 1:
Einsatz eines leistungsstärkeren Vakuumerzeugers.
Vorteil:

- Kraftübertragung wie gefordert
- Einfache Lösung

Nachteil:

- Leckage bleibt unverändert hoch
- Hoher Energieaufwand

Möglichkeit 2:
Verringerung des Sauger-Durchmessers oder der Durchlässe.
Vorteil:

- Leckage wird verringert (Energiekosten)

Nachteil:

- Kraftübertragung liegt evtl. unter dem erforderlichem Vakuumniveau.

Um bei Leckfluss die richtige Auswahl an Vakuumerzeugern treffen zu können, ist, wie oben schon erwähnt wurde, ein Versuchsaufbau notwendig. Mit Hilfe von Diagrammen kann damit der optimale Vakuumerzeuger ausgewählt werden. Diese Auswahlhilfe wird auf Seite 27 ausführlich beschrieben.

Auswahlhilfe von Vakuumerzeuger bei Leckfluss

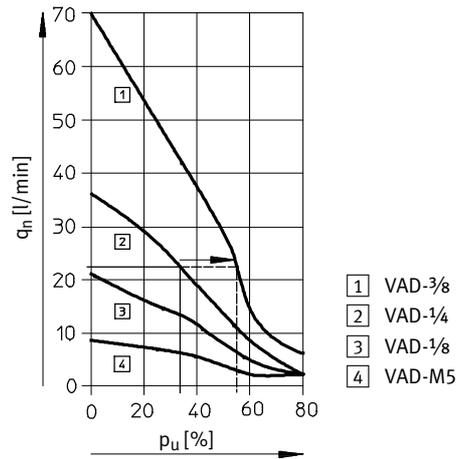
Zur Bestimmung der genauen Leckrate in Vakuumsystemen bzw. -anwendungen ist eine sichere Methode notwendig. Nur damit kann optimale Abhilfe z. B. durch

größer dimensionierte Vakuumerzeuger geschaffen und die Sicherheit und Funktion des Vakuumsystems gewährleistet werden.

Grafische Darstellung als Hilfsmittel

- Grafische Darstellung des Saugvermögens in Abhängigkeit von Vakuum/Betriebsdruck in einem Diagramm (alle Ejektoren in einem Diagramm).

Saugvermögen q_n in Abhängigkeit vom Vakuum p_u



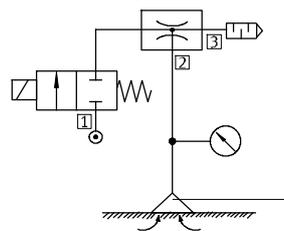
Alle Kurven im Diagramm verlaufen fast linear nach unten. Das maximale Saugvermögen der einzelnen Vakuum-Ejektoren wird bei atmosphärischem Luftdruck (0% Vakuum) erreicht.

Je höher das Vakuum, desto geringer also das Saugvermögen eines Vakuumerzeugers, bis hin zu einer maximalen Leistungsgrenze.

Dieses Diagramm ist ein sehr gutes Hilfsmittel, um schnell und zuverlässig herauszufinden, welcher Vakuumerzeuger benötigt wird, um trotz leckender Werkstoffmaterialien die gewünschte Vakuumhöhe zu erreichen.

Versuchsaufbau

- Versuchsaufbau mit Ejektor als Vakuumerzeuger, Vakuummeter (Manometer) als Messinstrument sowie Sauggreifer und Werkstück als Leckagequelle. In der folgenden Abbildung ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.



- 1 Druckluftanschluss
- 2 Saugeranschluss
- 3 Abluftanschluss

Bei gleichem Versorgungsdruck wird nun der Betriebsdruck (Vakuum) des Systems gemessen. Die Leistung eines Ejektors bei normalen Bedingungen, also ohne Leckage, ist aus dessen technischem Datenblatt sowie aus dem Diagramm Saugvermögen in Abhängigkeit von Vakuum/Betriebsdruck ersichtlich. Die gemessenen Ergebnisse aus dem Versuchsaufbau werden dann mit den bekannten Daten verglichen.

Auswahlhilfe von Vakuumerzeuger bei Leckfluss

Vorgehensweise

Bei offensichtlich leckenden Systemen (z. B. durch poröse oder raue Werkstücke) muss die Leckrate festgestellt werden.

Um gegebenenfalls einen geeigneten Vakuumerzeuger zu bestimmen, der dieser Anwendung entspricht und das ge-

forderte Vakuumniveau erzeugen kann, wird folgendes Vorgehen empfohlen:

Feststellung der Leckrate

- Versuchsaufbau
- Ablesen des erreichten Vakuums, bzw. Betriebsdrucks
- Vergleich Ergebnis mit Kurvenverlauf in Grafik
- Differenz Saugvermögen = Leckrate

In einem Versuchsaufbau, wie bereits schematisch gezeigt, wird über eine definierte Sauggreifer-Größe, einen Vakuumerzeuger und Druckversorgung (5,5 ... 6 bar) ein Werkstück angesaugt.

Bei einem dichten System muss der auf dem Vakuummeter angezeigte Wert mit dem aus den technischen Angaben des Vakuumerzeugers ersichtlichen Wert übereinstimmen. Bei einem leckenden System wird das erreichte Vakuum am Vakuummeter abgelesen.

Mit dem gemessenen Vakuumwert und in Verbindung mit dem Diagramm (Saugvermögen in Abhängigkeit vom Vakuum/Betriebsdruck) lässt sich dann die Leckrate bestimmen.

Beispiel

Bei einem Versuchsaufbau in Verbindung mit dem Ejektor [2] VAD-¼ wird bei voller Druckversorgung ein Vakuum von 35% erreicht. Zieht man, von diesem Ergebnis ausgehend, auf der Skala eine vertikale und eine horizontale Linie, die sich auf der

Kurve des Ejektors [2] schneiden, so lässt sich der Restluftstrom auf der Skala Saugvermögen ablesen. Dieser Restluftstrom entspricht der Leckrate des Systems, denn bei einem dichten System würde dieser Restluftstrom = 0 sein.

Ergebnis:
Der Restluftstrom bzw. die Leckrate beträgt = 22 l/min.
Einziger Nachteil dieser Methode ist, dass nicht festgestellt werden kann, ob die Leckage durch das Werkstück selbst oder unter dem Sauggreifer-Rand bei rauher Oberfläche entsteht.

Ermittlung der richtigen Ejektorgröße

- Schnittpunkt der nun bekannten Leckrate mit Kurven anderer Ejektoren vergleichen.
- Ermittlung des erreichbaren Vakuums durch Projektion der Schnittpunkte der Leckrate nach unten.
- Auswahl des Ejektors, der das erforderliche Vakuumniveau erreicht.

Umgekehrt kann man nun bei einer bekannten Leckrate von 22 l/min aus dem Diagramm „Saugvermögen in Abhängigkeit vom Vakuum“ das erreichbare Vakuumniveau mit anderen Vakuumerzeugern ablesen.

Verlängert man die horizontale Linie, die zuvor zur Ermittlung der Leckrate (Vorgehen 1) im Diagramm gezeichnet wurde, so lässt sich im Schnittpunkt mit Kurven anderer Ejektoren und die

anschließende Projektion nach unten auf die Vakuumskala das Vakuumniveau bei unveränderter Leckrate mit anderen Vakuumerzeugern feststellen.

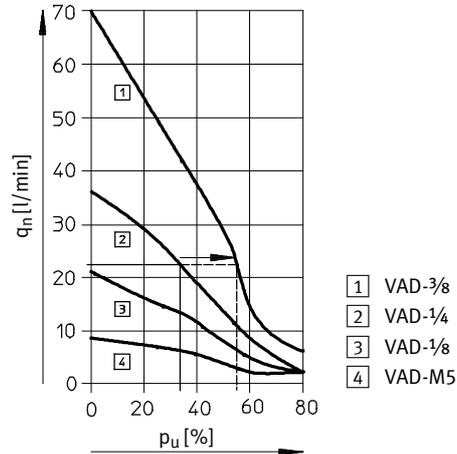
Auswahlhilfe von Vakuumerzeuger bei Leckfluss

Beispiel

Verlängert man diese horizontale Linie, muss es mit einer anderen Kurve einen Schnittpunkt geben. Beim nächst größeren Vakuumerzeuger [1] VAD-3/8 schneidet die Linie bei 52% Vakuum.

Die Kurve des nächst kleineren Vakuumerzeugers [3] wird überlaufen, es gibt keinen Schnittpunkt, d. h. durch die geringe Saugleistung würde bei diesem Leckfluss kein Vakuum erzeugt werden, da die angesaugte Luftmenge geringer als die leckagebedingte Luftmenge ist.

Saugvermögen q_n in Abhängigkeit vom Vakuum p_u



Ergebnis:

In diesem Anwendungsfall würde der nächst größere Vakuumerzeuger [1] ein Vakuumniveau von 52% erreichen.

Falls dieses Vakuumniveau für die Anwendung ausreichend hoch wäre, liegt die Wahl bei diesem Ejektor, andernfalls ist ein noch leistungsfähigerer Vakuum-Ejektor auszuwählen (Kurven auf diesem Diagramm nicht vorhanden).

Fazit

Diese Methode ist ein gutes Hilfsmittel, um bei bekannter Leckrate die richtige Ejektorgröße zu ermitteln.

Allerdings sollte beachtet werden, dass Leckage auch an anderen Stellen in einem Vakuumsystem wie zum Beispiel an

- Dichtungen,
- Schlauchverbindungen,
- Kupplungen auftreten können.

Als Anmerkung ist zu sagen, dass aus verschiedenen Gründen Leckage, wenn nur irgendwie möglich, zu vermeiden ist.

- Sicherheitsrisiko
Bei Leckfluss nimmt die Gefahr zu, dass das Vakuumsystem den erforderlichen Druck nicht mehr erzeugen kann und das Werkstück beim „Handling“ abfällt.

- Energiekosten
Bei entsprechendem Leckfluss ist der Luftverbrauch (Energieverbrauch) eines Ejektors um vieles höher als bei einem dichten System.
- Zeit
Bei Leckfluss verlängert sich die Zeit, um das entsprechende Vakuumniveau zu erzeugen.

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

FESTO

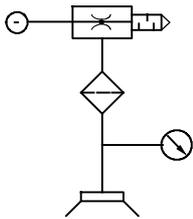
Technische Symbole			
<p>In Funktionsschaltbildern, aber auch bei der Beschreibung einzelner Komponenten, tauchen in dieser Systembeschreibung immer wieder technische Symbole auf, die diese Komponenten grafisch darstellen.</p> <p>Im folgenden Abschnitt sind diese Symbole grafisch dargestellt und beschrieben.</p>	<p>Vakuum-Ejektor</p> <p>Das technische Symbol auf Funktionsschaubildern aller Vakuum-erzeuger von Festo.</p>	<p>Vakuummeter</p> <p>Mess- und Kontrolleinrichtung zur analogen Anzeige des Vakuums.</p>	<p>Filter</p> <p>Filtert die angesaugte Luft und verhindert das Verschmutzen des Ejektors.</p>
	<p>Vakuum-Sauggreifer</p> <p>Standard, extratief, rund, oval. In technischen Schaltplänen steht dieses Symbol für den kompletten Sauggreifer (Saugerhalter + Sauger + Zubehör).</p>	<p>Rückschlagventil</p> <p>Verhindert, dass angesaugte Luft gegen die Ansaugrichtung zurückfließen kann, d. h. das Ventil hat seinen Durchfluss in nur eine Richtung.</p>	<p>Speicherbehälter</p> <p>Druckluftspeicher, der das Ablegen eines zuvor angesaugten Werkstücks unterstützt.</p>
	<p>Faltenbalg-Sauggreifer</p> <p>1,5fach, 3,5fach. Im technischen Schaltplan steht das Symbol für den kompletten Sauggreifer.</p>	<p>Magnetventil</p> <p>Verschiedene Ventilarten (meist 2-Wege-Ventile) erfüllen in der Vakuumtechnik die EIN-/AUS- oder Abblasfunktion.</p>	<p>Drossel</p> <p>Zur Regulierung der Durchflussmenge bzw. des Druckes.</p>
	<p>Schalldämpfer</p> <p>Dämpft die Druckluft, die mit Überschall aus der Venturi-Düse strömt, bevor sie in die Atmosphäre gelangt.</p>		

Schaltpläne mit Vakuum-Komponenten

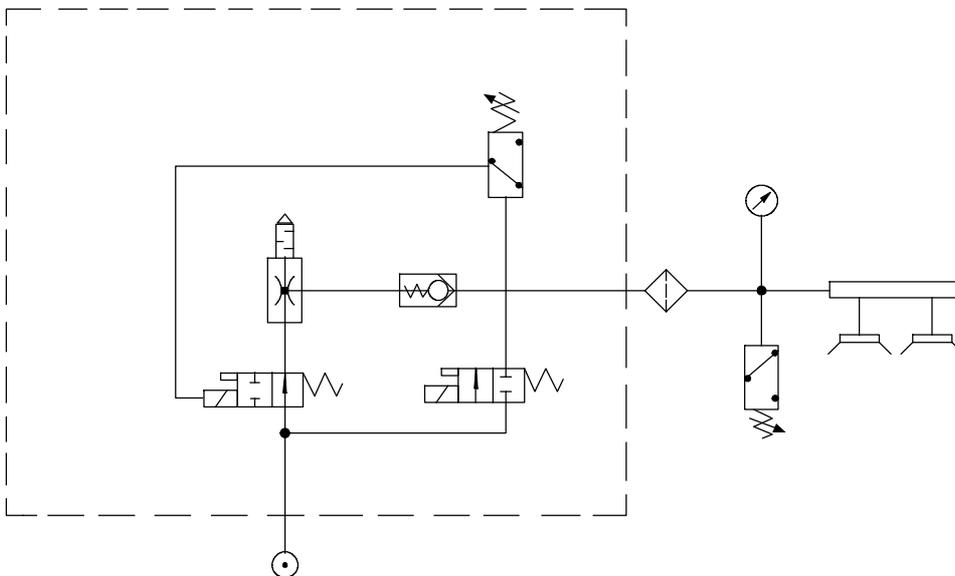
Schaltpläne dienen zum allgemeinen Verständnis der Funktionsweise bzw. zur schematischen Darstellung von Vakuumkomponenten hinsichtlich zum gesamten System. In den nachfolgenden

technischen Zeichnungen sind exemplarisch einige Pneumatikschaltpläne dargestellt. Diese sollen als Orientierungshilfe im Umgang mit den Symbolen der Vakuumtechnik dienen.

Einfacher Vakuumkreis



Geregelter Vakuumkreis



Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Vakuum-Ejektoren

Vakuumerzeuger sind das Kernstück eines jeden Vakuumsystems. Die Funktionsweise von Vakuum-Ejektoren und das Venturi-Prinzip wurden bereits im Kapitel Grundlagen (→ 12) erläutert.

Bei Festo kommen ausschließlich Ejektoren zum Einsatz, die nach dem einstufigen Aufbauprinzip funktionieren.

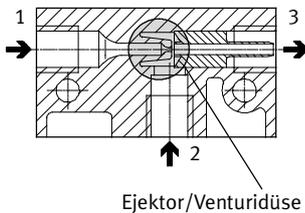
Je nach Anwendungszweck und Leistungserfordernis bietet Festo eine Auswahl an Ejektoren unterschiedlichster Art und Ausstattung. Diese Vakuumerzeuger sind in folgende Ejektor-Gruppen unterteilt:

- Grund-Ejektoren
- Inline-Ejektoren
- Kompakt-Ejektoren

Jede Gruppe ist in Ejektoren unterschiedlichster Leistungsklassen und Ausstattungen unterteilt.

Grund- und Inline-Ejektoren

Die Funktionen der Grund- und Inline-Ejektoren beschränkt sich im wesentlichen auf die Grundfunktion der Ejektoren: die Erzeugung eines Vakuums.



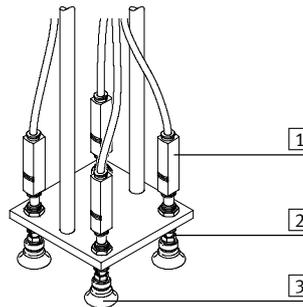
- 1 = Druckluft/Strahldüse
- 2 = Vakuum/Sauger-Anschluss
- 3 = Abluft/Empfängerdüse

Die Ejektoren bestehen in ihrer Bauweise nur aus einer Saugdüse nach dem Venturi-Prinzip.



Steuerung, Überwachung sowie andere Funktionen hängen von externen und zusätzlichen Komponenten innerhalb des Vakuumsystems ab. Aus diesem Grunde ist ihre Bauweise, im Vergleich zu anderen Vakuum Ejektoren, meist extrem klein.

Durch die extrem kleine Bauweise können Ejektoren dieser Art meist direkt dort, wo Vakuum benötigt wird, auch in großen Stückzahlen, eingesetzt werden. Sie finden ihre Anwendung auch in Vakuumprozessen, bei denen komplizierte und aufwendige Steuerungstechnik nicht benötigt werden.



- 1 Ejektor
- 2 Saugerhalter
- 3 Sauger

Kompakt-Ejektoren

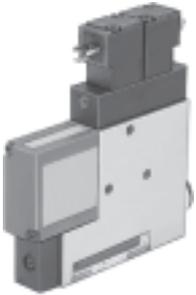
In der Praxis werden an Vakuum-Systeme große Anforderungen in bezug auf Funktion, Geschwindigkeit (Leistung) und immer mehr auch auf Wirtschaftlichkeit gestellt.

Deshalb können Vakuum-Ejektoren mehr, als nur die bloße Vakuumzeugung: Kompakt-Ejektoren haben mehrere Komponenten im bzw. am Gehäuse integriert und bilden so komplette Funktionseinheiten.

Je nach Ejektor und Ausführung bestehen diese Funktionseinheiten neben der Vakuumsaugdüse aus folgenden Komponenten:

- Magnetventile
- Filter
- Rückschlagventile
- Schalldämpfer
- Vakuumschalter

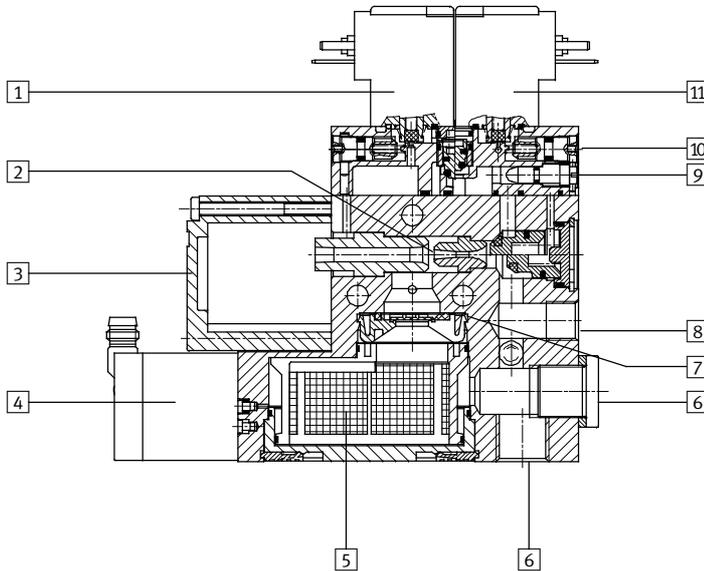
Vakuum-Ejektor VADMI-...



Am Beispiel eines Vakuum-Ejektors VADMI-... werden Komponenten und Funktionen einer kompletten Funktionseinheit verdeutlicht:

Im Produktschnitt (→ 34) sind die einzelnen Komponenten gekennzeichnet. Funktionen, Nutzen und Besonderheiten werden in den Erläuterungen beschrieben.

Allgemeines Wissen



Komponenten

- | | | | |
|---|-----------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1 Elektro-Magnetventil für Abwurfimpuls (VADMI-..., VAD-M...-I-...) | 3 Spezialschalldämpfer | 7 Rückschlagventil | 10 Handhilfsbetätigung |
| 2 Venturidüse (Strahl- und Empfängerdüse) | 4 Vakuumschalter | 8 Druckluftanschluss | 11 Elektro-Magnetventil für Vakuumerzeugung |
| | 5 Filter für zu evakuierende Luft | 9 Handeinstellung des Abwurfimpulses | |
| | 6 Zwei Vakuumanschlüsse | | |

Beschreibung	Funktion		Nutzen
1 Elektro-Magnetventil für Abwurfimpuls – 3/2-Wegeventil – Steuert Abwurfimpuls	Nach Abschalten der Spannung am Elektro-Magnetventil für Vakuumerzeugung 11 und Zuschalten der Spannung am Elektro-Magnetventil für Abwurf-	impuls wird das Vakuum am Anschluss 6 durch Druckbeaufschlagung beschleunigt abgebaut.	<ul style="list-style-type: none"> • Schneller Abbau des Vakuums • Schnelles und präzises Ablegen der Werkstücke • Kurze Arbeitszyklen des Vakuum-Ejektors
2 Venturidüse (Strahl- und Empfängerdüse) – Wichtigste Komponente des Ejektors – Instrument zur Vakuumerzeugung	Wird der Druckluftanschluss 8 beaufschlagt, strömt die Druckluft in die Strahldüse. Durch die Düsenverengung beschleunigt die Druckluft auf die bis zu 5fache Schallgeschwindigkeit. Dieser Luftstrom wird von der Empfän-	gerdüse aufgefangen und in den Schalldämpfer 3 abgeleitet. Zwischen Strahldüse und Empfängerdüse entsteht eine Sogwirkung, welche die Luft aus dem Filter 5 evakuiert. Am Vakuumanschluss 6 entsteht ein Vakuum.	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung und Beeinflussung der Leistung des Ejektors durch Variieren des Düsendurchmessers bzw. des Versorgungsdrucks
3 Spezialschalldämpfer (geschlossen, flächig oder säulenförmig) – Zur Geräuschminderung der Abluft	Der Schalldämpfer besteht aus einem luftdurchlässigen Kunststoff oder einer Metalllegierung. Beim Austritt aus der Strahldüse hat der Luftstrom die bis zu 5fache Schallgeschwindigkeit.	Der Schalldämpfer bremst diesen Luftstrom ab und verringert dadurch den Schallpegel, bevor die Druckluft (Abluft) in die Atmosphäre gelangt.	<ul style="list-style-type: none"> • Minimiert den Schallpegel der Abluft während des Ejektorbetriebes

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

FESTO

Komponenten			
Beschreibung	Funktion		Nutzen
<p>4 Vakuumsschalter mit PNP- oder NPN-Ausgang</p> <ul style="list-style-type: none"> – Zur Drucküberwachung 	<p>Am Vakuumsschalter wird mit zwei Potentiometern der Vakuumbereich eingestellt, der das Werkstück halten soll. Ist das Vakuum erreicht, schaltet ein Signal die Vakuumdüse ab (Luftsparfunktion). Das Rückschlagventil 7 hält in diesem Zustand das</p>	<p>Vakuum aufrecht. Wird der Vakuumbereich unterschritten, steuert das Signal das Anschalten der Vakuumdüse. Kann das eingestellte Vakuum aufgrund einer Fehlfunktion nicht mehr erzeugt werden, schaltet die Vakuumdüse ab.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Luftsparfunktion: Innerhalb des eingestellten Vakuumbereichs ist die Vakuumdüse ausgeschaltet • Sicherheitsfunktion: Steuerung der Vakuumdüse bei Wertüber- oder -unterschreitung ab.
<p>5 Filter für zu evakuierende Luft</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mit Verschmutzungsanzeige – 40 µm Filterfeinheit 	<p>Zwischen Vakuumanschluss 6 und der Vakuumdüse 2 bzw. dem Rückschlagventil 7 ist ein großer Kunststofffilter integriert. Beim Ansaugvorgang wird die Luft</p>	<p>gefiltert, bevor sie zur Saugdüse gelangt. Ein abnehmbares Sichtfenster zeigt den Verschmutzungsgrad des Filters an.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Verschmutzung des Systems • Schutz der Komponenten • Anzeige für rechtzeitige Wartung
<p>6 Zwei Vakuumanschlüsse (V) bzw. (2)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Mit Innengewinde 	<p>Hier können Vakuum-Komponenten angeschlossen werden (z. B. Vakuum-Sauggreifer).</p>	<p>Je nach Anwendung können wahlweise einer oder beide Ausgänge gleichzeitig genutzt werden.</p>	
<p>7 Integriertes Rückschlagventil</p> 	<p>Nach Abschalten der Vakuumdüse verhindert dieses Rückschlagventil den Rückfluss der an-</p>	<p>gesaugten Luft und somit einen Druckabfall.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vakuum bleibt erhalten, nachdem die Vakuumerzeugung abgeschaltet wird (Luftsparfunktion in Verbindung mit dem Vakuumsschalter 4)
<p>8 Druckluftanschluss (P) bzw. (1)</p>	<p>Im Gehäuse des Ejektors ist der Anschluss (P) bzw. (1) für die</p>	<p>Druckluftversorgung zum Erzeugen des Vakuums angebracht.</p>	
<p>9 Handeinstellung des Abwurfimpulses</p>	<p>Die Intensität des Luftstroms und somit die Zeit zum Entfernen des</p>	<p>Werkstücks vom Sauggreifer lässt sich manuell justieren.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung des Systems auf die Vakuumanwendung
<p>10 Handhilfsbetätigung</p>	<p>Stößel am Magnetventil, das ohne elektrisches Signal geschaltet werden kann. Ein anstehendes</p>	<p>elektrisches Signal kann jedoch nicht unwirksam gemacht werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Manuelles Schalten des Magnetventils
<p>11 Elektro-Magnetventil für Vakuumerzeugung</p> <ul style="list-style-type: none"> – 3/2-Wegeventil – Steuert Vakuumerzeugung 	<p>Bei Signal wird die Saugdüse mit Druckluft durchströmt und erzeugt ein Vakuum. Bei Abschalten</p>	<p>des Signals wird der Luftstrom unterbrochen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Luftsparfunktion in Verbindung mit dem Vakuumsschalter 4 und dem Rückschlagventil 7

Wichtige Größen

Auswahl eines Sauggreifers

Hauptkriterien zur Auswahl eines Sauggreifers:

- Gesamtvolumen des Vakuumsystems
- Zykluszeit eines Arbeitsvorgangs
- Wirtschaftlichkeit des Ejektors
- Zusätzliche Funktionen

Gesamtvolumen

Die Summe der Volumina ist notwendig zur Berechnung der Zykluszeit eines Arbeitsvorgangs.

Das abzusaugende Volumen des Systems setzt sich zusammen aus:

- Saugervolumen
- Saugerhaltevolumen
- Schlauchvolumen

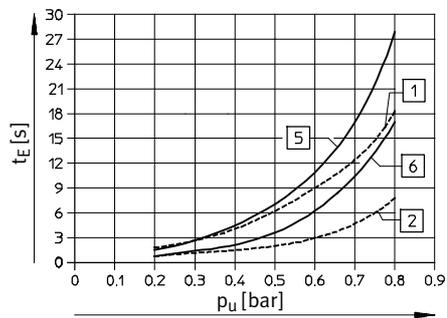
Zykluszeit eines Arbeitsvorgangs

Um Stückmengen festzulegen, ist der Zeitfaktor ausschlaggebend. Mit der Evakuierungszeit wird die Wirtschaftlichkeit eines Ejektors ermittelt.

Einzelkriterien zur Zeitermittlung eines Arbeitszyklus:

- Evakuierungszeit: Zeit, die der Ejektor benötigt, um das erforderliche Vakuum zu erzeugen
- Belüftungszeit: Zeit, um das angesaugte Werkstück abzulegen (Abbau des Vakuums)
- Handling-/Rückfahrzeit

Evakuierungszeit t_E für 1 l Volumen bei 6 bar Betriebsdruck p_u



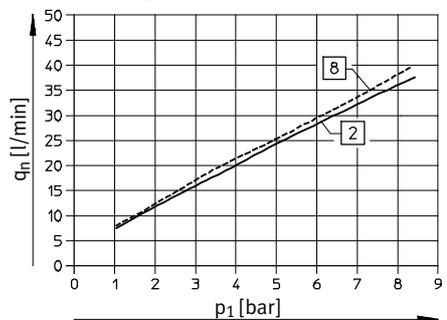
- 1 VN-05-H...
- 2 VN-07-H...
- 5 VN-05-M...
- 6 VN-07-M...

Wirtschaftlichkeit des Ejektors

Faktoren zur Ermittlung des Energieverbrauchs eines Ejektors:

- Luftverbrauch pro Zeiteinheit (aus den technischen Daten des Ejektors zu entnehmen)
- Anzahl der Arbeitszyklen pro Zeiteinheit

Luftverbrauch q_n in Abhängigkeit des Betriebsdrucks p_1



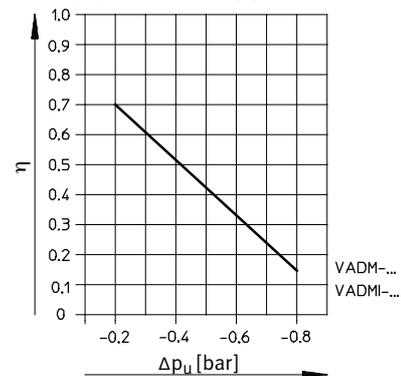
- 2 VN-07-H...
VN-07-M...
- 8 VN-07-L...

Vergleich von Vakuumerzeugern

Der Wirkungsgrad ist ein Kriterium, welches einen objektiven Vergleich von Vakuumsaugdüsen verschiedenster Bauart ermöglicht.

Im Produktteil dieses Kataloges kann die Ermittlung des Wirkungsgrads eines Ejektors nachvollzogen werden (→ 18). Mit Hilfe des Diagramms lassen sich Wirkungsgrad-Kurven anderer Saugdüsen vergleichen.

Wirkungsgrad η in Abhängigkeit vom Vakuum Δp_u bei P_{nenn} 6 bar



Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

FESTO

Sauggreifer

Allgemeines

Vakuum-Sauggreifer sind das „Bindeglied“ zwischen dem Vakuumerzeuger und dem zu transportierenden Werkstück.

Sie sind eine einfache, preiswerte und betriebssichere Lösung für das Handling von Werkstücken, Teilen, Verpackungen ...

Festo bietet eine Vielzahl an Sauggreiferformen:

- Universal-Sauggreifer
- Flach-Sauggreifer
- Faltenbalg-Sauggreifer
- Spezial-Sauggreifer

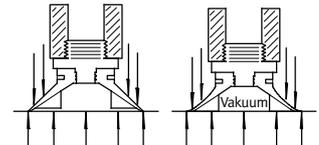
Funktionsweise

Setzt der Sauggreifer auf die Werkstückoberfläche auf, herrscht an der Ober- und Unterseite des Saugers der gleiche Luftdruck (Atmosphärendruck). Der aktivierte Vakuumerzeuger

saugt nun die Luft an der Saugerunterseite ab. Ein Vakuum entsteht. Da der Luftdruck innerhalb des Vakuums geringer ist als an der Außenseite des Saugers, drückt

der Atmosphärendruck das Werkstück auf den Sauger.

Je größer das Vakuum ist, desto größer die Haltekraft, die den Sauger auf das Werkstück presst.



Werkstoffe

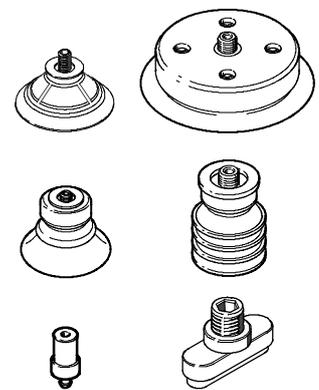
Die Sauger gibt es in verschiedenen Werkstoffen.

- Nitrilkautschuk
- Polyurethan
- Polyurethan, warmfest
- Silikon
- Fluorkautschuk
- Butadien-Kautschuk, antistatisch

Je nach Einsatzbereich sind folgende Bedingungen für die Materialbeschaffenheit ausschlaggebend:

- Verschleißfestigkeit
- Beanspruchungsgrad
- Brancheneinsatz (Lebensmittelindustrie, Elektronik)
- Beschaffenheit der Werkstücke (Oberfläche, Gewicht, Empfindlichkeit, usw.)
- Umgebung (chemisch aggressive Medien, Temperaturen)

Die Auswahlkriterien für den geeigneten Saugerwerkstoff sind in einer Tabelle zusammengefasst (→ 44).



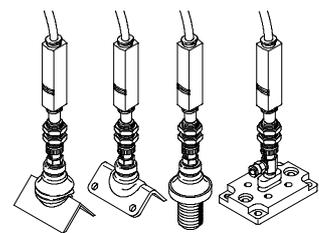
Formen

Die Sauggreifer können die unterschiedlichsten Werkstücke bewegen.

Verschiedenste Oberflächenstrukturen und Konturen von Werkstücken verlangen eine anpassungsfähige Greifertechnologie. Die Vakuumtechnik ermög-

licht es, unterschiedlichste Produkte und Materialien (unförmige, kompakte oder poröse) mit unterschiedlichsten Flächen (ebene, unebene, runde, schräge oder gewölbte) einfach, günstig und vor allem sicher zu handhaben.

Ebenso ist es möglich, Werkstücke mit Massen von einigen wenigen Gramm bis zu mehreren Kilogramm aufzunehmen.



Zubehör

Für alle Sauger gibt es passende Saugerhalter.

Diese können je nach Ausführung in unterschiedlichen Anwendungsbereichen eingesetzt werden können.

Sie unterscheiden sich nach folgenden Kriterien:

- Haltergröße
- Saugeranschluss
- Mit oder ohne Höhenausgleich
- Lage und Art des Vakuumanchlusses
- Befestigungsgewinde

Die Saugerhalter sind mehr als bloße Befestigungsvorrichtungen für Sauger.



Sauggreifer

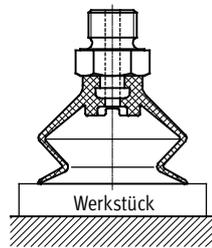
Vorteile eines Faltenbalgsaugers

Wird das Volumen eines Faltenbalgsaugers evakuiert, zieht sich die Form des Saugers etwas zusammen. Dabei wird das Werkstück leicht angehoben.

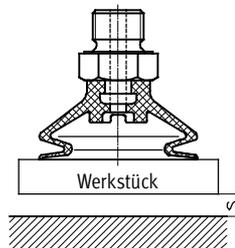
Dieser sogenannte elastische Vertikalhub kann in der Praxis als Kurz-Vertikalhub genutzt werden, um Werkstücke schonend aus ihren Aufnahmen zu heben.

Das Evakuieren eines Faltenbalgsaugers gliedert sich in zwei Phasen:

Phase 1
Der Vakuumsauger sitzt ohne Einfluss von äußeren Kräften auf dem Werkstück auf.



Phase 2
Der Vakuumsauger wird mit Vakuum beaufschlagt. Dabei wird das Werkstück angesaugt und je nach Größe des Vakuums und des Werkstückgewichts ein Gleichgewichtszustand erreicht.



Leitfaden für die Sauggreiferauswahl

Um einen Sauggreifer entsprechend einer Handhabungsaufgabe auslegen zu können, sind mehrere Kriterien zu beachten:

Einflussparameter	Auswirkungen auf			
	Erforderliche Saugkraft	Anzahl der Sauger	Saugerform	Saugermaterial
Werkstückabmessungen	■	■	-	
Werkstückgewicht	■	■	■	
Werkstücksteifigkeit	-	■	■	
Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks	rauh	■	■	■
	trocken, nass	■	■	-
	rund, schräg, gewölbt	-	-	■
Umwelteinflüsse, wie Witterung, Reinigungsmittel, Lebensmitteltauglichkeit, Temperatur	-	-	-	■
Verteilung der Sauggreifer auf dem Werkstück	■	■	-	
Anordnung des Sauggreifers zur Bewegungsrichtung	■	■	■	
Max. Beschleunigung	■	■	■	

Physikalische Größen

Die im folgenden beschriebenen physikalischen Größen sind Bestandteile der Formeln, die zur

Berechnung der Hauptkriterien notwendig sind.

Reibungskoeffizient μ

Der Reibungskoeffizient ist der Reibwert zwischen Sauggreifer und Werkstück. Er bestimmt die tangentialen Kräfte.

Es ist in der Praxis sehr schwierig, genaue Angaben über diesen Wert zu machen. Deshalb müssen je nach Anwendungsfall entsprechende Versuche durchgeführt werden.

Um eine Auslegung durchführen zu können, gibt es folgende theoretische Richtwerte:

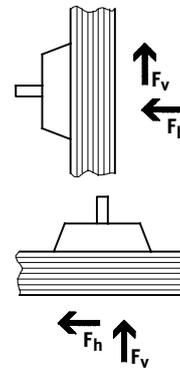
Oberflächen	
ölig	$\mu = 0,1$
nass	$\mu = 0,2 \dots 0,3$
rauh	$\mu = 0,6$
Holz, Metall, Glas, Stein ...	$\mu = 0,5$

Sicherheitswert S

Die Unfallverhütungsvorschriften (UVV) schreiben verbindlich einen Sicherheitsfaktor von 1,5 vor. Dieser Mindestwert muss mit in die Berechnungen einbezogen werden.

Bei kritischen, inhomogenen oder porösen Werkstoffen oder rauen Oberflächen sollte der Faktor auf ≥ 2 erhöht werden. Der Sicherheitswert ist auch bei der Lage der Sauggreifer wichtig.

Bei vertikaler Sauggreiferlage oder bei Schwenkbewegungen sollte ebenfalls ein erhöhter Faktor gewählt werden.



Bei horizontaler Sauggreiferlage, bei der die Gewichtskraft vertikal am Sauger wirkt, kann ein Wert zwischen 1,5 und 2 verwendet werden.

Theoretische Haltekraft T_H

Diese Kraft wird bei trockener Oberfläche für die unterschiedlichsten Belastungsfälle der Anwendung errechnet. In dieser Formel werden folgende Faktoren berücksichtigt:

- Masse des Werkstücks m
- Reibkoeffizient μ
- Beschleunigung der Anlage (m/s^2)
- Erdbeschleunigung ($9,81 m/s^2$)
- Sicherheitswert S

Dabei wird nur das Ergebnis des ungünstigsten Belastungsfalles der Anwendung berücksichtigt.

Abreißkraft F_A

Die Abreißkraft ist abhängig vom Sauger- \varnothing und Saugerform. Kommen in einer Vakuumanwendung mehrere Sauggreifer gleichzeitig zum Einsatz, so muss das

Berechnungsergebnis der theoretischen Haltekraft T_H durch die Anzahl der Sauggreifer dividiert werden.

So lässt sich die Haltekraft des einzelnen Sauggreifers ermitteln. Die Abreißkraft des ausgewählten Saugers sollte immer größer sein als die ermittelte Haltekraft T_H .

Bei der Auswahl des Sauggreifers ist die Abreißkraft in den technischen Daten des Saugers angegeben.

Allgemeine Vorgehensweise anhand eines Berechnungsbeispiels

Zweck & Nutzen

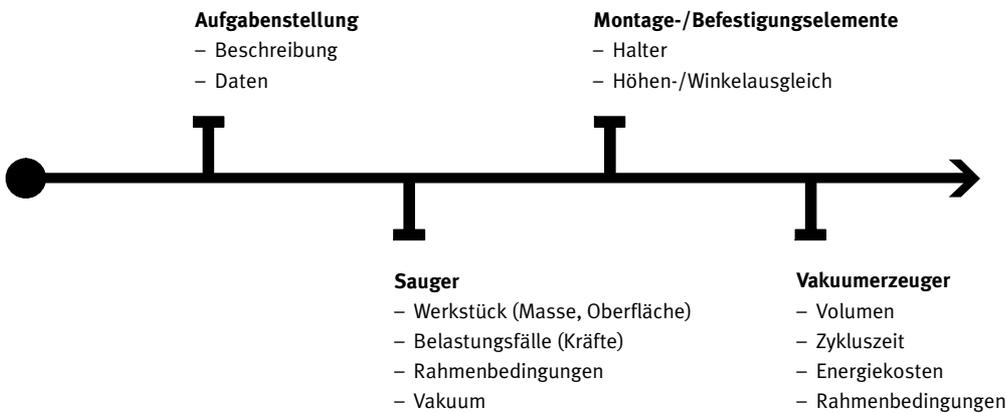
Aus sicherheitstechnischen aber auch wirtschaftlichen Gründen ist es wichtig, Prozesse und Verfahren ihren Anwendungen entsprechend auszulegen. Nur so können Systeme optimal eingesetzt und ausgelastet werden. (Dies gilt auch in der Vakuumtechnik.) Des-

halb ist im Vorfeld eine optimale Systemauslegung des Anwendungsfalles erforderlich, um das System seinen Anforderungen entsprechend zu dimensionieren und auszuwählen. Um dies zu vereinfachen, sind im folgenden Abschnitt die allge-

meine Vorgehensweise und die theoretischen Grundlagen zur Auswahl eines Vakuumsystems schrittweise aufgezeigt. Zur Veranschaulichung und Umsetzung von Theorie in Praxis ist ein Rechenbeispiel aufgezeigt, an dem die Systemauslegung Schritt

für Schritt nachvollzogen werden kann. Auf der unteren Abbildung ist die im Hause Festo empfohlene Vorgehensweise bei der Systemauslegung bzw. der Auswahl eines Vakuumsystems Schritt für Schritt dargestellt.

Aufgabenstellung	Saugerauswahl	Montage-/Befestigungselemente	Vakuumerzeuger
<p>Aus der Aufgabenstellung gehen Angaben sowie Anforderungen an das System hervor.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Werkstoff/Oberfläche • Abmessungen • Bewegungsrichtungen • Taktzeit/Zeitvorgaben • Konstruktive Gegebenheiten 	<p>Zur Auslegung des geeigneten Saugers müssen Masse, Haltekräfte und Abreißkräfte berechnet werden (→ 43). Außerdem müssen Oberflächenbeschaffenheiten des Werkstücks und Anforderungen an das Saugermaterial berücksichtigt werden (→ 43).</p>	<p>Bei der Auswahl von Befestigungselementen sollten folgende Kriterien berücksichtigt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Werkstückoberfläche • Position des Vakuumanchlusses • Art des Vakuumanchlusses • Art der Befestigung <p>Als Auswahlhilfe dient eine Tabelle mit den vorhandenen Haltern.</p>	<p>Bei der Auswahl eines Vakuumerzeugers ist die Berechnung folgender Werte notwendig:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gesamtvolumen • Zykluszeit • Energiekosten



Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Software Tool

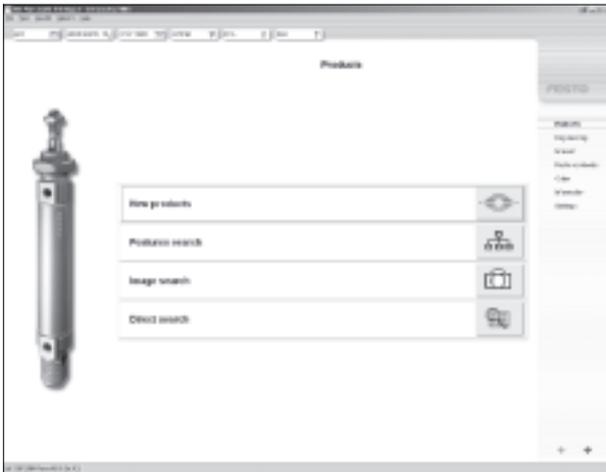
Als besonderen Service bietet Ihnen Festo eine kostenlose Software an. Dieses Software Tool ist eine sichere, bequeme und vor

allem schnelle Möglichkeit, die Auslegung an Vakuumsystemen vorzunehmen. Damit können die Vakuumkomponenten eines

Systems einzeln bestimmt und als Produktvorschlag aus dem Sortiment ausgewählt werden.



Software Vakuumauswahl
www.festo.com/de/engineering



Software Tool: Vakuumauswahl



Auswahlprogramm zur Berechnung der Masse des Werkstücks

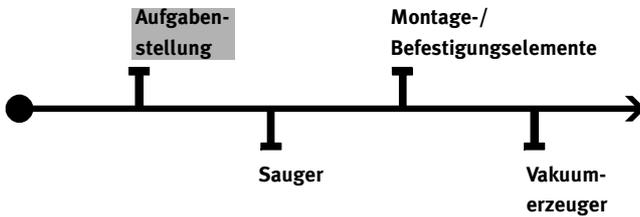


Programm zur Auswahl des Sauggreifers

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Aufgabenstellung



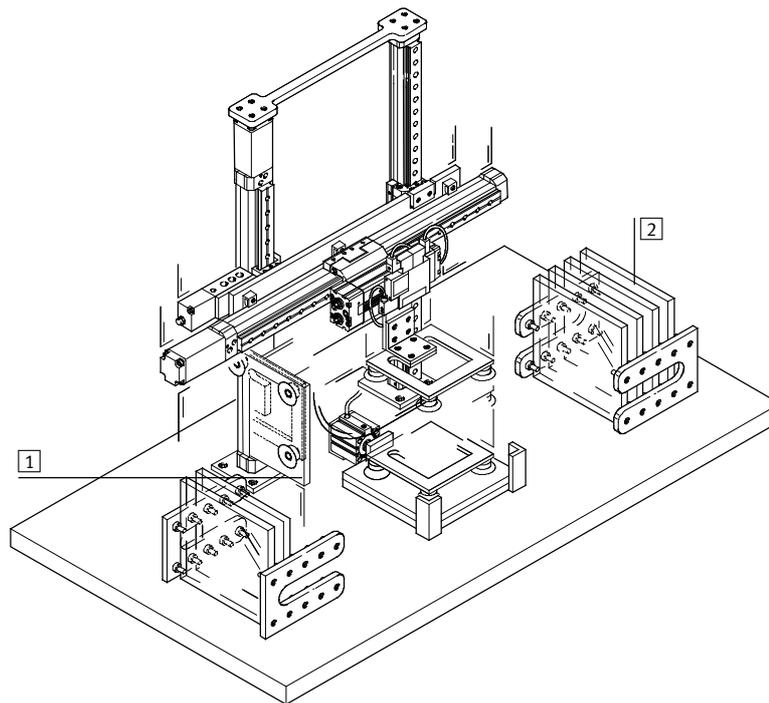
Ein Werkstück mit der Masse X ist anhand eines Vakuumsystems von Punkt **1** nach Punkt **2** zu transportieren.

Angaben zu Werkstück und Rahmenbedingungen des Vakuumsystems sind im unteren Abschnitt (gegebene Werte) aufgeführt und für die Berechnungen zu entnehmen.

Vakuumsystem, bestehend aus:

- Sauger
- Montage-/Befestigungselemente
- Vakuumerzeuger

Zu ermitteln ist das geeignete Vakuumsystem für diesen Anwendungsfall aus dem Produktprogramm von Festo. Dazu sind bestimmte Werte, bzw. Kräfte notwendig (gesuchte Werte).



Gegebene Werte

Zum Werkstück		Zum Handhabungssystem	
Werkstoff	Stahlblech	Druckluftversorgung	6 bar
Oberfläche	Eben, glatt, leicht ölig (wie z. B. aus der Presse)	Bewegungsrichtungen	horizontal anheben horizontal verfahren 90° schwenken vertikal verfahren
Abmessungen	Länge: 200 mm	Max. Beschleunigung	5 m/s ²
	Breite: 100 mm	Taktzeit	max. 3,5 s
	Höhe: 2 mm	Zeitliche Anforderungen	zum Ansaugen: < 0,5 s zum Ablegen: 0,1 s
		Sicherheitsfaktor	1,5fach
		Konstruktive Gegebenheiten	2 Sauggreifer für vibrationsfreien Transport; federnde Auf-/Abnahme des Werkstücks; seitliche Anschlüsse der Vakuumleitungen; Befestigung der Sauggreifer über Außengewinde.

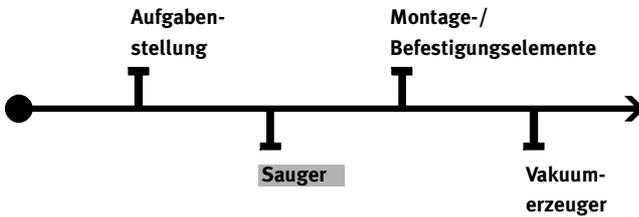
Gesuchte Werte

- Für die Bestimmung des Vakuumsystems sind folgende Werte zu berechnen:
Dabei sind weitere Rahmenbedingungen zu berücksichtigen.
Folgende Reihenfolge ist empfehlenswert:
- Masse (Gewicht) des Werkstücks
 - Halte- und Beschleunigungskräfte
 - Gesamtvolumen
 - Zykluszeit
- Weitere Rahmenbedingungen
- Material und Oberflächenbeschaffenheit
 - Höhen- und Winkelausgleich
 - Kosten

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Auswahl Sauger



Checkliste

Masse	Oberfläche Werkstück	Saugermaterial	Kräfteermittlung
Was wiegt das Werkstück?	Wie ist die Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks?	Welchen Anforderungen muss der Vakuumsauger gerecht werden? <ul style="list-style-type: none"> • Anwendungsgebiete • Beständigkeitsanforderungen, Temperatur 	Wieviel müssen die Sauggreifer tragen? <ul style="list-style-type: none"> • Haltekraften – Lastfälle in den verschiedenen Bewegungsrichtungen • Abreißkraft – Ermittlung der Abreißkraft pro Sauger (Bestimmung des Sauger-Ø)

Schritt 1: Berechnung der Masse m des Werkstücks

$$m = L \times B \times H \times \rho$$

Beispiel:

$$m = 20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 0,2 \text{ cm} \times 7,85 \text{ g/cm}^3$$

$$m = 314 \text{ g}$$

$$m = 0,314 \text{ kg}$$

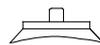
m = Masse [kg]
 L = Länge [cm]
 B = Breite [cm]
 H = Höhe [cm]
 ρ = Dichte [g/cm³]

Schritt 2: Auswahl des Sauggreifers

Nach Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks

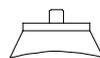
Je nach Oberflächenbeschaffenheit des Werkstücks empfehlen sich unterschiedliche Saugerformen des Sauggreifers:

Standardsauger



- Für flache und leicht gewölbte Oberflächen, z. B. Metallbleche oder Kartons.

Sauger extratief



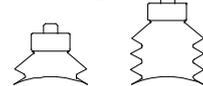
- Für runde oder stark gewölbte Werkstücke

Sauger oval



- Für schmale, längliche Werkstücke, wie z. B. Profile und Rohre

Faltenbalg



- Für schiefe Flächen, je nach Saugnapf-Ø zwischen 5° und 30°
- gewölbte, runde Flächen, großflächige, biegeschlaife Werkstücke,
- empfindliche Werkstücke wie Glasflaschen
- als preiswerter Höhenausgleich

Ergebnis

Für das Stahlblech mit einer ebenen, glatten Oberfläche in der Beispielaufgabe eignet sich ein Standardsauger.

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung



Schritt 2: Auswahl des Sauggreifers

Nach Materialbeschaffenheit des Werkstücks

Je nach Einsatzbereich sind folgende Bedingungen zu beachten:

- Dauerbelastung im Mehrschichtbetrieb

- Lebenserwartung
- Umgebung (z. B. chemisch-aggressive Medien, Temperaturen)

Es stehen unterschiedliche Werkstoffausführungen zur Verfügung z. B.:

- für glatte oder raue Oberflächen

- für hohe Temperaturen
- antistatische Ausführung für Elektronikbauteile

	Matereialeigenschaften	Nitrilkautschuk	Polyurethan	Polyurethan (warmfest)	Silikon	Fluorkautschuk	Butadien-Kautschuk (antistatisch)
	Material-Code	N	U	T	S	F	NA
	Farbe	Schwarz	Blau	Rotbraun	Weiß transparent	Grau	Schwarz mit weißem Punkt
→	Verschleißfestigkeit/ Abriebwiderstand	**	***	***	*	**	**
	Anwendungsgebiete						
	Sehr hohe Beanspruchung	–	*	*	*	–	–
	Lebensmittel	–	–	–	*	–	–
→	Ölige Werkstücke	*	*	***	–	*	*
	Hohe Umgebungstemperaturen	–	–	–	*	*	–
	Niedrige Umgebungstemperaturen	–	*	*	*	–	–
→	Glatte Oberfläche (Glas)	*	*	*	–	*	–
	Rauhe Oberfläche (Holz, Stein)	–	*	**	–	–	–
	Antistatisch	–	–	–	–	–	*
	Geringer Abdruck	–	*	*	*	–	–
	Beständigkeit						
	Witterung	*	**	**	***	***	**
→	Reißfestigkeit	**	***	***	*	**	**
	Bleibende Verformung	**	*	**	**	***	**
	Hydrauliköl, mineralisch	***	***	***	–	***	–
	Hydrauliköl, synthetischer Ester	*	–	–	–	*	–
	unpolare Lösemittel (z. B. Testbenzin)	***	**	**	–	***	–
	polare Lösemittel (z. B. Aceton)	–	–	–	–	–	–
	Ethanol	***	–	–	***	*	–
	Isopropanol	**	–	–	***	***	–
	Wasser	***	–	–	**	**	–
	Säuren (10%)	–	–	–	*	***	–
	Laugen (10%)	**	*	*	***	**	–
	Temperaturbereich, langfristig [°C]	–10 ... +70	–20 ... +60	–10 ... +80	–30 ... +180	–10 ... +200	–10 ... +70
	Shorehärtigkeit A [°]	50 ±5	60 ±5	72 ±5	50 ±5	60 ±5	50 ±5
	Besonderheiten						
		preiswert	verschleissfest	ölbeständig	lebensmittel-echt	chemikalien- und temperaturlbeständig	antistatisch
	Anwendungsgebiete						
		konventionelle Anwendung	raue Oberfläche	Automobil-industrie	Lebensmittel-industrie	Glasindustrie	Elektronik-industrie

*** sehr gut geeignet
** gut geeignet

* geeignet
– nicht geeignet

Ergebnis

Für das Werkstück in der Beispielaufgabe wählen wir einen Sauger aus Polyurethan Materialcode U.

Schritt 3: Berechnung der Halte- und Abreißkräfte

Ermittlung der Haltekraft

Zur Ermittlung der Haltekraft wird einerseits die Masse des Werkstücks und andererseits die Beschleunigung benötigt.

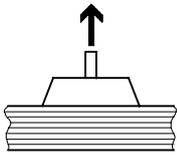


Hinweis

Die Beschleunigungskräfte, die in einer vollautomatischen Anlage wirken, sind bei der Systemauslegung eines Sauggreifers unbedingt zu berücksichtigen.

Fall 1

Sauggreiferlage horizontal, Bewegungsrichtung vertikal (günstigster Fall)



$$F_H = m \times (g + a) \times S$$

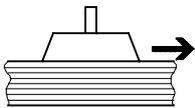
Beispiel:

$$F_H = 0,314 \text{ kg} \times \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \times 1,5$$

$$F_H \approx 7 \text{ N}$$

Fall 2

Sauggreiferlage horizontal, Bewegungsrichtung horizontal



$$F_H = m \times \left(g + \frac{a}{\mu}\right) \times S$$

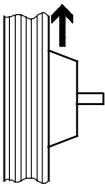
Beispiel:

$$F_H = 0,314 \text{ kg} \times \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,1}\right) \times 1,5$$

$$F_H \approx 28 \text{ N}$$

Fall 3

Sauggreiferlage vertikal, Bewegungsrichtung vertikal (ungünstigster Fall)



$$F_H = \left(\frac{m}{\mu}\right) \times (g + a) \times S$$

Beispiel:

$$F_H = \left(\frac{0,314 \text{ kg}}{0,1}\right) \times \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \times 2$$

$$F_H \approx 93 \text{ N}$$

Ergebnis:

Gemäß der Aufgabenstellung muss das Ergebnis aus Fall 3 von 93 N berücksichtigt werden, da die Anlage das Werkstück auch in vertikaler Sauggreiferlage mit

vertikaler Kraft transportiert. Dieser Wert wird nun für die weitere Systemauslegung verwendet.

F_H = theoretische Haltekraft des Sauggreifers [N]
 m = Masse [kg]
 g = Erdbeschleunigung [9,81 m/s²]

a = Beschleunigung der Anlage [m/s²]
 Not-Aus-Beschleunigung beachten!

S = Sicherheit (Mindestwert 1,5fache Sicherheit, bei kritischen, inhomogenen oder porösen Werkstoffen oder rauen Oberflächen 2,0 oder höher)

μ = Reibwert¹⁾
 0,1 für ölige Oberflächen
 0,2 ... 0,3 für nasse Oberflächen
 0,5 für Holz, Metall, Glas, Stein ...
 0,6 für raue Oberflächen

1) Die angegebenen Reibwerte sind gemittelte Werte und müssen für das jeweils verwendete Werkstück überprüft werden!

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Schritt 3: Berechnung der Halte- und Abreißkräfte

Ermittlung der Abreißkraft

- F_A = theoretische Abreißkraft [N]
- F_H = theoretische Haltekraft des Sauggreifers [N]
(Ergebnis → 45)
- n = Anzahl der Sauggreifer
(in der Beispielaufgabe sind 2 Sauggreifer geplant)

$$F_A = \frac{F_H}{n}$$

Beispiel:
 $F_A = \frac{93 \text{ N}}{2}$
 $F_A \approx 47 \text{ N}$

Abreißkraft F_A in Abhängigkeit von Sauger- \varnothing und Saugerform

Sauger rund		F_A bei -0,7 bar				Sauger oval		F_A bei -0,7 bar
Bestellangaben	Sauger- \varnothing [mm]	Standard 	extratief 	Faltenbalg 1,5fach 	Faltenbalg 3,5fach 	Bestellangaben	Saugergröße [mm]	oval 
→ ess	2	0,1 N				→ ess	4x10	2 N
	4	0,4 N					4x20	3,4 N
	6	1,1 N					6x10	2,9 N
	8	2,3 N					6x20	5,9 N
	10	3,9 N		4,7 N	3,9 N		8x20	8 N
	15	8,5 N	9,8 N				8x30	10,9 N
	20	16,3 N	17 N	12,9 N	8,2 N		10x30	15,2 N
	30	40,8 N	37,2 N	26,2 N	20,8 N		15x45	32 N
	40	69,6 N	67,6 N	52,3 N	42,4 N		20x60	62,8 N
	50	105,8 N	103,6 N	72,6 N	63,4 N		25x75	92,5 N
	60	166,1 N	162,5 N				30x90	134,4 N
	80	309,7 N	275 N	213,9 N				
	100	503,6 N	440,8 N					
150	900 N							
200	1 610 N							

Abreißkraft F_A zu niedrig
↑

Sicherer Bereich für die Beispielaufgabe

↓
Sauger- \varnothing für Werkstück zu groß

Hier im Beispiel entscheiden wir uns für 2 Sauggreifer:

- Ausführung rund
- Sauger- \varnothing 40 mm
- mit einer Abreißkraft von 69,6 N.

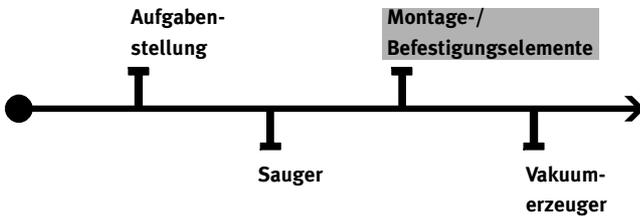
-  - Hinweis

Die Tragfähigkeit des Vakuum-Sauggreifers muss über dem errechneten Wert liegen!

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

Auswahl Montage-/Befestigungselemente



Checkliste

Werkstück	Vakuumanschluss	Anschlussart	Befestigungsart
Berücksichtigung der Werkstückoberfläche	Platzierung des Vakuumschlauches	Auswahl des Vakuumanchlusses an den Saugerhalter	Befestigung des Saugerhalters am Handlinggerät, z. B. Roboterarm
<ul style="list-style-type: none"> Winkelausgleich bei großen Unebenheiten Gefederte Halter bei empfindlichen Werkstücken sowie unterschiedlichen Aufnahmehöhen 	<ul style="list-style-type: none"> oben seitlich 	<ul style="list-style-type: none"> Gewinde, Steckanschluss, Stecknippel 	<ul style="list-style-type: none"> Innen-/Außengewinde

Auswahl des Saugerhalters

Die Auswahl des Saugerhalters sowie der Zubehörteile „Winkelausgleich“ und „Vakuumsfilter“ geschieht über den vorab bestimmten Sauger-Ø.

Laut Beispielaufgabe sollen die Werkstücke federnd aufgenommen und abgelegt werden.

Der Anschluss der Vakuumleitungen soll seitlich über Steckanschlüsse erfolgen.

Die Befestigung der Sauggreifer soll über Außengewinde erfolgen.

- Gefederte Halter: Bei Überhub und Höhentoleranzen empfiehlt sich ein Halter mit Höhenausgleich, ebenso bei empfindlichen Werkstücken, die schonend und abgefedert aufgesetzt werden sollen.

- Unterschiedliche Vakuumanchlüsse [1]:
 - oben
 - seitlich
- 3 Anschlussarten [1]:
 - Steckanschluss QS
 - Stecknippel PK
 - Gewinde G
- Unterschiedliche Befestigungsgewinde des Halters [2]:
 - Innengewinde
 - Außengewinde



Sauger rund

aus Beispielaufgabe

Sauger-Ø [mm]	2	4	6	8	10	15	20	30	40	50	60	80	100	150	200
Haltergröße	1		2		3		4			5			6		
Saugeranschluss [3]	3 mm		4 mm		M4x0,7		M6x1			M10x1,5			M20x2		
Bestellangaben	→ esh														

Sauger oval

Saugergröße [mm]	4x10	4x20	6x10	6x20	8x20	8x30	10x30	15x45	20x60	25x75	30x90	
Haltergröße	4							5				
Saugeranschluss [3]	M6x1							M10x1,5				
Bestellangaben	→ esh											

Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

FESTO

Haltertyp									
aus Beispielaufgabe ↓									
									
		HA	HB	HC	HCL	HD	HDL	HE	HF
→	Höhenausgleich	-	-					-	
Vakuumanchluss ¹									
	oben		-			-	-		
→	seitlich	-		-	-			-	-
→	Gewindeanschluss G								
	Steckanschluss QS							-	-
	Stecknippel PK							-	-
Befestigungsgewinde des Halters ²									
	Innengewinde	-		-	-	-	-	-	-
→	Außengewinde		-						

Ergebnis

Unter Berücksichtigung aller Anforderungen:

Saugerhalter HD, Größe 4

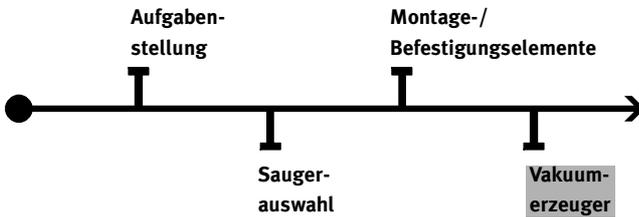


Grundlagen der Vakuumtechnik

Einführung

FESTO

Auswahl Vakuumerezeuger



Bei der Auswahl eines geeigneten Ejektors spielen deshalb die schon in der Checkliste aufgeführten Kriterien die entscheidende Rolle.

- Gesamtvolumen
- Zykluszeit
- Wirtschaftlichkeit
- Funktionen
- Konstruktive Vorgaben

Hinweis

Nahezu alle Vakuum-Ejektoren von Festo erreichen ein Vakuumniveau von ca. 85%, mit Ausnahme der neuen VN-Ejektoren, die speziell auf einen Unterdruck von ca. 50% ausgelegt sind.

Zu Handlingaufgaben von leichten bis schweren Werkstücken oder Lasten können demnach alle Ejektoren ausnahmslos verwendet werden.

Checkliste

Gesamtvolumen	Zykluszeit	Wirtschaftlichkeit	Funktionen
<p>Wie hoch ist das abzusaugende Gesamtvolumen?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung des Saugervolumens • Berücksichtigung des Saugervolumens • Berechnung des Schlauchvolumens 	<p>Wie lange dauert ein Arbeitszyklus?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Evakuierungszeit • Ermittlung der Handling-/Rückfahrzeit • Berechnung der Belüftungszeit 	<p>Wie hoch sind die Energiekosten?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Energiekosten anhand des Luftverbrauchs und Anzahl der Arbeitszyklen 	<p>Welche zusätzlichen Funktionen soll der Vakuumerezeuger erfüllen?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Filter, Steuerung, Rückschlagventile, Vakuumschalter, Abblasfunktion, etc.

Konstruktive Vorgaben

Welche Vorgaben liegen vor?

- Abmaße, Gewicht, Einbauort etc.

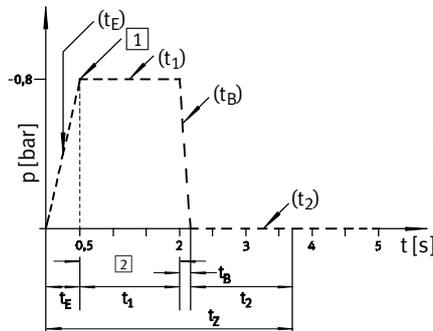
Schritt 1: Ermittlung des Gesamtvolumens des Systems (abzusaugendes Volumen)

Es ist das Volumen von Vakuumsaugern, Haltern und Schläuchen zu ermitteln und zu einem Gesamtvolumen zu addieren.

Saugervolumen V_1	Saugerhaltervolumen V_2	Schlauchvolumen V_3	Gesamtvolumen V_G
<p>Das Saugervolumen ist im Datenblatt bei den jeweiligen Vakuumsaugern ESG, VAS, VASB zu finden.</p> <p>Je nach Produktfamilie kann das Saugervolumen aus einer Tabelle oder einem Diagramm abgelesen werden.</p> <p>In unserem Anwendungsbeispiel hatten wir uns für 2 Sauggreifer entschieden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausführung rund • Sauger-\varnothing 40 mm • Abreißkraft von 69,6 N <p>Bei diesen Saugern ergibt sich aus dem Datenblatt ein Saugervolumen von 1 566 mm³ je Sauger.</p> <p>$V_1 = 2 \times 1\,566\text{ mm}^3 = 3\,132\text{ mm}^3$</p>	<p>Da es eine Vielzahl unterschiedlicher Haltertypen und Anschlussarten gibt, wurden im Datenblatt der Produktfamilie ESG Tabellen erstellt, in dem die Saugerhalter mit dem jeweiligen Volumen aufgeführt sind.</p> <p>In unserem Anwendungsbeispiel fiel die Wahl auf folgenden Saugerhalter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Saugerhalter HD, Größe 4 mit QS Anschluss <p>$V_2 = 678\text{ mm}^3$</p>	<p>Nachdem Sauger, Saugerhalter und Anschlussarten bestimmt sind, kann das Schlauchvolumen bestimmt werden.</p> <p>Druckluftschläuche PUN: Außen-/Innen-\varnothing [mm] 3,0/2,1 4,0/2,6 6,0/4,0 8,0/5,7 10,0/7,0</p> <p>Zur Bestimmung des Volumens ist folgende Formel zu verwenden:</p> $V_3 = \pi \times \frac{D^2}{4} \times L$ <p>D = Schlauch-Innen-\varnothing [mm] L = Schlauchlänge [mm]</p> <p>Im Anwendungsbeispiel wird ein Saugerhalter mit QS-6 Kupplungen verwendet. Deshalb ist ein Druckluftschlauch mit einem Außen-\varnothing von 6 mm erforderlich. Um den Vakuumerzeuger mit den beiden Saugern zu verbinden, ist eine Schlauchlänge (L) von ca. 1 m (1 000 mm) erforderlich.</p> $V_3 = \pi \times \frac{4^2}{4} \times 1\,000$ <p>$V_3 = 12\,566\text{ mm}^3$</p>	<p>$V_G = V_1 + V_2 + V_3$ $V_G = 3\,132 + 678 + 12\,566$ $V_G = 16\,376\text{ mm}^3 (16,38\text{ cm}^3)$</p>

Schritt 2: Ermittlung der Zykluszeit

$T_Z = \text{Evakuierungszeit } t_E + \text{Handlingzeit } t_1 + \text{Belüftungszeit } t_B + \text{Rückfahrzeit } t_2$



- t_E = Evakuierungszeit
- t_1 = Transport
- t_B = Abgabe
- t_2 = Rückgabe
- 1 = Abholung
- 2 = eingesparte Zeit

Ein Arbeitszyklus lässt sich in einzelne Zeitintervalle unterteilen, die entweder gemessen aber auch errechnet werden müssen. Die einzelnen Zeiten addiert ergeben die Zykluszeit.

Evakuierungszeit t_E

Die Evakuierungszeit, d. h. die Zeit um ein Volumen auf ein bestimmtes Vakuumniveau zu bringen, ist ein gutes Hilfsmittel, um die Leistungsfähigkeit eines Vakuumherstellers zu beurteilen. Die

Evakuierungszeit finden sie im Datenblatt des jeweiligen Vakuumherstellers. In diesem Beispiel sind Diagramme zu einigen Saugdüsen der Produktfamilie VN... zu sehen.

Berechnung:
Im Anwendungsbeispiel hatten wir in Schritt 1 ein Gesamtvolumen für das Vakuumsystem von $V_G = 16,38 \text{ cm}^3$ (17 cm^3) ermittelt. Mit einem einfachen 3-Satz kann man nun die Evakuierungszeit t_E für dieses System mit jedem beliebigen Vakuumhersteller berechnen. Laut Aufgabenstellung soll $t_E < 0,5 \text{ s}$ sein, bezogen auf ein Vakuumniveau von 80%.

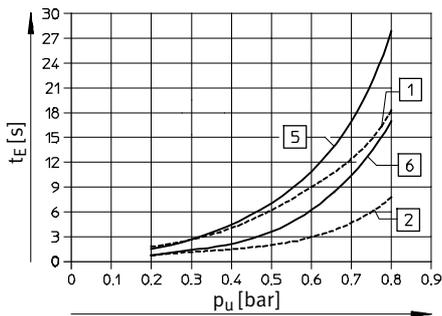
Beispiel 1: VADMI-45
 $t_E = V_G \times t_{E1} / 1\,000$
 $t_E = 17 \text{ cm}^3 \times 25 \text{ s} / 1\,000 \text{ cm}^3$
 $t_E = 0,425 \text{ s (0,43 s)}$

Beispiel 2: VADMI-70
 $t_E = V_G \times t_{E1} / 1\,000$
 $t_E = 17 \text{ cm}^3 \times 11 \text{ s} / 1\,000 \text{ cm}^3$
 $t_E = 0,187 \text{ s (0,19 s)}$

Beispiel 3: VN-07-H
 $t_E = V_G \times t_{E1} / 1\,000$
 $t_E = 17 \text{ cm}^3 \times 8 \text{ s} / 1\,000 \text{ cm}^3$
 $t_E = 0,136 \text{ s (0,14 s)}$

t_E = Evakuierungszeit (V_G)
 t_{E1} = Evakuierungszeit ($V = 1\,000 \text{ cm}^3$)
 V_G = Gesamtvolumen (aus Beispiel)

Evakuierungszeit t_E für 1 Liter Volumen bei 6 bar Betriebsdruck p_u



- 1 VN-05-H...
- 2 VN-07-H...
- 5 VN-05-M...
- 6 VN-07-M...

Handlingzeit t_1

Die Zeit, die zum Handling des Werkstückes benötigt wird, nach-

Ende des Saugvorgangs (z. B. mit Stoppuhr ermittelt = 1,5 s).

Belüftungszeit t_B

Die Zeit, die das Vakuumsystem benötigt, den Druck (Vakuum) wieder abzubauen und das Werkstück abzulegen. Die Belüftungszeit ist den technischen Daten der jeweiligen Vakuumhersteller zu entnehmen.

Die Angaben gelten für 1 Liter Volumen bei 6 bar Betriebsdruck bei max. Vakuumniveau.

Mit einem einfachen 3-Satz kann man nun die Belüftungszeit t_B für dieses System berechnen.

t_B = Evakuierungszeit (V_G)
 t_{B1} = Evakuierungszeit ($V = 1\,000 \text{ cm}^3$)
 V_G = Gesamtvolumen (aus Beispiel)

Beispiel 1: VADMI-45
 $t_B = V_G \times t_{B1} / 1\,000$
 $t_B = 17 \text{ cm}^3 \times 1,9 \text{ s} / 1\,000 \text{ cm}^3$
 $t_B = 0,03 \text{ s}$

Beispiel 2: VADMI-70
 $t_B = V_G \times t_{B1} / 1\,000$
 $t_B = 17 \text{ cm}^3 \times 0,59 \text{ s} / 1\,000 \text{ cm}^3$
 $t_B = 0,01 \text{ s}$

Beispiel 3: VN-07-H
 $t_B = V_G \times t_{B1} / 1\,000$
 $t_B = 17 \text{ cm}^3 \times 1,1 \text{ s} / 1\,000 \text{ cm}^3$
 $t_B = 0,02 \text{ s}$

Rückfahrzeit t_2

Die Zeit, die das Vakuumsystem benötigt, um wieder in die Ausgangsstellung zurückzufahren, nachdem das Werkstück abgelegt wurde (z. B. mit Stoppuhr ermittelt = 1,5 s).

Zykluszeit t_Z

Beispiel 1: VADMI-45
 $t_Z = t_E + t_1 + t_B + t_2$
 $t_Z = 0,43 + 1,5 + 0,03 + 1,5$
 $t_Z = 3,46 \text{ s}$

Beispiel 2: VADMI-70
 $t_Z = t_E + t_1 + t_B + t_2$
 $t_Z = 0,19 + 1,5 + 0,01 + 1,5$
 $t_Z = 3,2 \text{ s}$

Beispiel 3: VN-07-H
 $t_Z = t_E + t_1 + t_B + t_2$
 $t_Z = 0,14 + 1,5 + 0,02 + 1,5$
 $t_Z = 3,16 \text{ s}$

Schritt 3: Überprüfung der Wirtschaftlichkeit

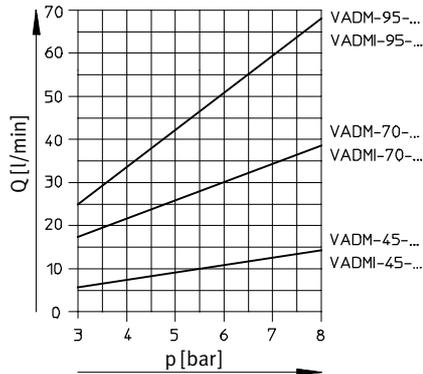
Aufgrund des Luftverbrauchs werden die Energiekosten ermittelt.

Ermittlung des Luftverbrauchs pro Arbeitszyklus Q_Z

Auch diese Diagramme sind im Datenblatt beim jeweiligen Vakuumerzeuger (z. B. VADM-..., VADMI-...) zu finden.
Die Vakuumsaugdüsen VADMI-... haben ein integriertes Rückschlagventil, welche das Vakuum nach Abschalten der Vakuumdüse aufrecht erhält (Voraussetzung: System ist leakagefrei).

In Verbindung mit dem Vakuumschalter dient es als Luftsparfunktion: Während des Werkstücktransports wird somit keine Luft verbraucht.
Die Saugdüsen VN-... haben diese Funktion nicht. Deshalb bleibt hier die Vakuumdüse während des Werkstücktransports in Betrieb, um das Werkstück halten zu können.

Luftverbrauch Q in Abhängigkeit vom Betriebsdruck p



Q_Z = Luftverbrauch pro Arbeitszyklus
 t_E = Evakuierungszeit für Anwendungsfall
 Q = Luftverbrauch pro Vakuumerzeuger [l/min]

Beispiel 1: VADMI-45

$$Q_Z = t_E \times \frac{Q}{60}$$

$$Q_Z = 0,43 \text{ s} \times \frac{11 \text{ l}}{60 \text{ s}}$$

$$Q_Z = 0,08 \text{ l}$$

Beispiel 2: VADMI-70

$$Q_Z = t_E \times \frac{Q}{60}$$

$$Q_Z = 0,19 \text{ s} \times \frac{31 \text{ l}}{60 \text{ s}}$$

$$Q_Z = 0,10 \text{ l}$$

Beispiel 3: VN-07-H

$$Q_Z = (t_E + t_1) \times \frac{Q}{60}$$

$$Q_Z = (0,13 \text{ s} + 1,5 \text{ s}) \times \frac{28 \text{ l}}{60 \text{ s}}$$

$$Q_Z = 0,76 \text{ l}$$

Ermittlung der Arbeitszyklen pro Stunde Z_h

Z_h = Arbeitszyklen pro Stunde
 t_z = Zeit pro Arbeitszyklus
 t_E = Evakuierungszeit für Anwendungsfall

Beispiel 1: VADMI-45

$$Z_h = \frac{3600 \text{ s}}{t_z}$$

$$Z_h = \frac{3600 \text{ s}}{3,46 \text{ s}}$$

$$Z_h = 1040$$

Beispiel 2: VADMI-70

$$Z_h = \frac{3600 \text{ s}}{t_z}$$

$$Z_h = \frac{3600 \text{ s}}{3,2 \text{ s}}$$

$$Z_h = 1125$$

Beispiel 3: VN-07-H

$$Z_h = \frac{3600 \text{ s}}{t_z}$$

$$Z_h = \frac{3600 \text{ s}}{3,16 \text{ s}}$$

$$Z_h = 1139$$

Ermittlung des Luftverbrauchs pro Stunde Q_h

Q_h = Luftverbrauch pro Stunde
 Q_Z = Luftverbrauch pro Arbeitszyklus
 Z_h = Arbeitszyklen pro Stunde

Beispiel 1: VADMI-45

$$Q_h = Q_Z \times Z_h$$

$$Q_h = 0,08 \text{ l} \times 1040$$

$$Q_h = 83,20 \text{ l} (0,08 \text{ m}^3)$$

Beispiel 2: VADMI-70

$$Q_h = Q_Z \times Z_h$$

$$Q_h = 0,10 \text{ l} \times 1125$$

$$Q_h = 112,5 \text{ l} (0,12 \text{ m}^3)$$

Beispiel 3: VN-07-H

$$Q_h = Q_Z \times Z_h$$

$$Q_h = 0,76 \text{ l} \times 1139$$

$$Q_h = 865,64 \text{ l} (0,87 \text{ m}^3)$$

Ermittlung der Energiekosten pro Jahr K_{EA}

K_{EA} = Energiekosten pro Jahr
 Q_h = Luftverbrauch pro Stunde

Kosten für Druckluft¹⁾:
1 m³ bei 7 bar: 0,02 €/m³,
bei einem Strompreis von
0,10 €/kWh

$$K_{EA} = Q_h \times \text{Druckluftkosten/m}^3 \times \frac{\text{Betriebszeit}}{\text{Tag}} \times \frac{\text{Betriebszeit}}{\text{Jahr}}$$

Vakuumerzeuger	Luftverbrauch pro Zyklus Q_Z [l]	Zyklen pro Stunde Z_h	Luftverbrauch pro Stunde Q_h [m ³]	Energiekosten pro Jahr K_{EA} ²⁾ [€]
VADMI-45	0,08	1 040	0,08	5,76
VADMI-70	0,10	1 125	0,12	8,64
VN-07-H	0,76	1 139	0,87	62,63

1) Im Preis sind Material-, Abschreibungs-, Lohnkosten ... berücksichtigt
2) Energiekosten bei Schichtbetrieb 16 Stunden/Tag und 220 Tage/Jahr

Schritt 4: Berücksichtigung zusätzlicher Funktionen/Komponenten und konstruktiver Vorgaben

Auswahl zusätzlicher Funktionen/Komponenten:

Die Auswahl dieser Komponenten richtet sich nach bestimmten Anforderungen an die Leistung, Funktionalität sowie Einsatzort und Anwendung des Systems.

Alle Angaben zur Leistung oder zu Komponenten sind im Datenblatt beim jeweiligen Produkten zu finden.

Magnetventile

Ein Vakuumsystem benötigt zur Steuerung Elektro-Magnetventile für Vakuumerzeugung. Damit wird das Vakuum ein- und ausgeschaltet.

Vakuumerzeuger

- VADM-..., VADMI-...
- VAD-M-..., VAD-M...-I-...

Zur Beschleunigung und Optimierung der Arbeitszyklen kann ein weiteres Ventil als Abwurfimpulsgeber eingesetzt werden.

Vakuumerzeuger

- VADMI...-
- VADM...-I-...



Die Nenndurchflussmenge des Magnetventils darf nicht kleiner sein als das Saugvermögen des Vakuumerzeugers bei Atmosphärendruck. (Beide Angaben sind im Datenblatt beim jeweiligen Produkt zu finden.)

Vakuumschalter

- Sicherheit durch Drucküberwachung
- Einstellbarer Schalterpunkt
- Schnelles Einstellen der Hysterese
- Digital/analoge Signalausgabe
- Display
- Anschlüsse

Filter

- Sicherheit: Keine Verschmutzung des Systems

- Verlängerung des Produktlebenszyklus und Reduzierung der Wartungsintervalle

Manometer

- Manuelle Drucküberwachung des Systems
- Sicherheitsfunktion

Schalldämpfer

- Minimierung der Lärmbelastung

Berücksichtigung konstruktiver Vorgaben

Bei der Auslegung eines Vakuumsystems müssen folgende Punkte hinsichtlich konstruktiver Vorgaben berücksichtigt werden:

- Größe
- Gewicht
- Beständigkeit

Zusammenfassung des Rechenbeispiels

Als Auswahlkriterien galten die Zykluszeit sowie die Wirtschaftlichkeit der Ejektoren.

Auswahl Sauger

Unter Berücksichtigung der Berechnungen zu Masse und Kräften sowie aller Kriterien ergibt sich folgendes Ergebnis:

Menge	2 Stück
Ausführung	rund
Sauger-Ø	40 mm
Abreißkraft	69,4 N
Material	Polyurethan

Auswahl Montage- und Befestigungselemente

Das Ergebnis berücksichtigt alle Systemanforderungen:

Haltertyp	HD
Größe	4

Auswahl Vakuumerzeuger

Im Vergleich standen drei Vakuumerzeuger, die aus dem Festo Produktprogramm willkürlich ausgewählt wurden:

Kompaktejektoren	VADMI-45	VADMI-70
Inline-Ejektoren	VN-07-H	

Ergebnis

Kompaktejektor VADMI-45

Zykluszeit

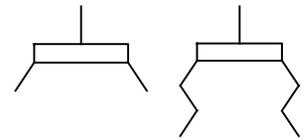
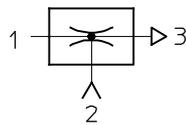
Alle drei Vakuumerzeuger lagen im Anwendungsbeispiel in einem vertretbaren Zeitrahmen und unter der in der Aufgabenstellung geforderten Maximalzeit von 3,5 Sekunden.

Wirtschaftlichkeit

Im Energieverbrauch und somit bei den Energiekosten schneidet der Vakuumerzeuger VADMI-45 am Besten ab. Die beiden Kompaktejektoren VADMI-45 und VADMI-70 liegen mit den Energiekosten fast gleich. Der größer dimensionierte Typ VADMI-70 hat zwar einen etwas höheren Luftverbrauch pro Zeiteinheit, kann aber das Vakuum schneller erzeugen.

Im Gegensatz dazu hat der Typ VADMI-45 einen kleineren Düsen-Ø und somit einen viel geringeren Luftverbrauch, sie kann jedoch das Vakuum nicht ganz so schnell erzeugen wie der Typ VADMI-70. Die Anzahl der Zyklen pro Zeiteinheit bzw. die Stückzahlen sind bei allen drei Vakuumerzeugern fast gleich.

Produkte für die Vakuumtechnik



Vakuumerzeuger

Ein Vakuum-Ejektor ist das Kernstück eines jeden Vakuumsystems.

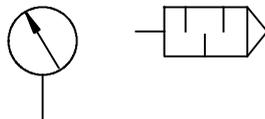
Abhängig von der Anwendung bzw. Leistungsanforderung steht ein umfassendes Angebot an Vakuum-Ejektoren von Festo zur Auswahl:

Grund- und Inline-Ejektoren

Vakuumsaugdüsen
VN-..., VAD-.../VAK-...

Kompakt-Ejektoren

Vakuumsaugdüsen
VADM-.../VADMI-...,
VAD-M.../VAD-M...-I-...



Vakuum-Zubehör

Steuern, Messen, Kontrollieren, Reinigen etc. sind wichtige Funktionen die, falls nicht schon standardmäßig in den Vakuumsystemen integriert, durch eine umfassende Auswahl an Zubehör erweitert werden können:

Vakuumsaugventil ISV-...

Vakuummeter VAM-...

Vakuumfilter VAF-...

Vakuumschalter VPEV-...

Weiteres Zubehör:
Längenausgleich, Adapter
Druckluftschläuche
QS-Steckverschraubungen

Vakuumsauggreifer

Die Sauggreifer sind das Verbindungsglied zwischen Vakuumsystem und Werkstück.

Unterschiedlichste Oberflächen-güte, -formen, -temperaturen sowie unterschiedlichste Massen von Werkstücken erfordern ein umfassendes Auswahl- und Kombinationsprogramm der Sauger. Festo hat mit seiner Saugerauswahl und dem Sauggreifer-Baukasten ESG eine Lösung für jeden Anwendungsfall:

Sauggreifer-Baukasten ESG-...

Saugnapfe VAS-.../VASB-...

