



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Bachelorthesis

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

Zuverlässigkeit, Analyse und Optimierung der Kompressionsanlagen in der Industrie

vorgelegt von:

Tarik Kurt

1124657

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Antoine Tordeux

M. Sc. Ing. Ibrahima Ba

Wuppertal, 04.02.2022

Zuverlässigkeit, Analyse und Optimierung der Kompressionsanlagen in der Industrie

am: 04.02.2022

Maschinenbau Verkehrssicherheit u.- Zuverlässigkeit

Uni.-Prof. Dr.-Ing. Antoine Tordeux

Bergische Universität Wuppertal

Fakultät für Sicherheitstechnik

Gaußstraße 20

42119 Wuppertal

Maschinenbau Verkehrssicherheit u.- Zuverlässigkeit

M. Sc. Ibrahima Ba

Bergische Universität Wuppertal

Fakultät für Sicherheitstechnik

Gaußstraße 20

42119 Wuppertal

Eidesstattliche Erklärung:

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wuppertal, 04.02.2022

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Einheiten und Formelzeichen.....	V
1. Einleitung.....	1
1.1. Aufbau und Zielsetzung der Arbeit.....	1
2. Physikalische technische Grundlagen.....	3
2.1. Starrkörper Kinematik	3
2.2. Freiheitsgrade	3
2.3. Rotation.....	4
2.4. Translation	5
2.5. Allgemeine und komplexe Bewegung	5
2.6. Physikalische Drücke	6
2.7. Volumenstrom.....	6
3. Stand der Technik	7
3.1. Unterschiede der Kompressionsanlagen	7
3.1.1. Hubkolbenkompressor	10
3.1.2. Membrankompressor	11
3.1.3. Freikolbenkompressor	13
3.1.4. Vielzellenkompressor.....	15
3.1.5. Flüssigkeitsringkompressor	16
3.1.6. Schraubenkompressor.....	18
3.1.7. Roots-Verdichter	22
3.1.8. Axialverdichter	23
3.1.9. Radialverdichter.....	23
3.2. Instandhaltungsstrategien	25
3.3. Industrie 4.0	26
4. Anwendungsmöglichkeiten der Kompressoren	29
5. Programmierung	31

5.1. Programmiersprache Python	31
5.2. Erweiterungspakete Visual-Python	32
5.3. CSV Comma-seperated Values	32
6. Vorausschauende Instandhaltung.....	33
6.1. Optimierung der Anlagen	38
6.2. Anschluss durch Alexa.....	40
7. Fazit.....	41
8. Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Starrkörper Kinematik.....	3
Abbildung 2: Freiheitsgrade.....	4
Abbildung 3: Rotation	4
Abbildung 4: Translation.....	5
Abbildung 5: Allgemeine und komplexe Bewegung.....	5
Abbildung 6: Laminare Strömung	6
Abbildung 7: Turbulente Strömung.....	6
Abbildung 8: Querschnittsveränderung	6
Abbildung 9: Turbokompressor	8
Abbildung 10: Kompressor ohne Keilriemen	9
Abbildung 11: Kompressor mit Keilriemen	9
Abbildung 12: Anordnungen der Hubkolbenkompressoren	10
Abbildung 13: Membrankompressor.....	13
Abbildung 14: Freikolbenkompressor	15
Abbildung 15: Vielzellenkompressor	16
Abbildung 16: Flüssigkeitsringkompressor	18
Abbildung 17: Schraubenkompressor	20
Abbildung 18: Schraubenkompressor	21
Abbildung 19: Roots-Verdichter.....	22
Abbildung 20: Sechsstufiger Axialverdichter	23
Abbildung 21: Radialverdichter.....	24
Abbildung 22: Instandhaltungsaufgaben	25
Abbildung 23: Industrielle Revolution	27
Abbildung 24: Definierte Konstanten im Python-Skript.....	33
Abbildung 25: Ausschnitt aus der Datenstruktur der eingelesenen CSV-Datei	35
Abbildung 26: Bestimmung der relativen RUL.....	36
Abbildung 27: Funktion "get_remaining_useful_life"	36
Abbildung 28: Excel Daten für Druck und Temperatur	38
Abbildung 29: Kette	39
Abbildung 30: Kette mit Zahnrad	39
Abbildung 31: Zusammengebautes Modell mit Schutz.....	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anwendungsmöglichkeiten der Kompressoren.....	29
Tabelle 2 – Variablen und Bedeutungen	34

Einheiten und Formelzeichen

Basiseinheit	Formelzeichen	Zeichen	Name
Länge	L	m	Meter
Masse	M	kg	Kilogramm
Zeit	T	s	Sekunde
Stromstärke	I	A	Ampere
Temperatur	T	K	Kelvin
Lichtstärke	I	cd	Candela
Spannung	U	V	Volt
Frequenz	f	Hz	Hertz

Einheit	Formelzeichen	Zeichen	Name
Kraft	F	N	Newton
Druck	p	Pa bar	Pascal Bar
Fläche	A	m ²	Quadratmeter
Volumen	V	m ³	Kubikmeter
Geschwindigkeit	v	m/s	Meter pro Sekunde
Masse	m	kg	Kilogramm
Dichte	ρ	kg/m ³	Kilogramm pro Kubikmeter
Temperatur	T	°C	Grad Celsius
Arbeit	W	J	Joule
Leistung	P	W	Leistung

1. Einleitung

Heutzutage werden Kompressionsanlagen vielseitig benötigt und eingesetzt. Beispielsweise im Gesundheitssystem, sowie in der Produktion, aber auch in X und in Y finden die Anlagen Anwendung. Durch eine immer besser werdende Technik und die fortschreitende Entwicklung in der Verfahrenstechnik wird eine bessere Lehre an Universitäten und ein immer schnelleres und effizienteres Arbeiten in der Industrie 4.0 möglich. Gleichzeitig wird der Menschheit ein breites Spektrum an Wissen und technischem Fortschritt zur Verfügung gestellt, das theoretisch unbegrenzt nutzbar ist. Die Fortgeschrittene Technik, vereinfacht im Alltag und in der Industrie vielseitige Einsatzmöglichkeiten. Auch die Entwicklung in der globalen Digitalisierung gehört dazu, so dass Arbeitsabläufe durch eine verbesserte Programmsteuerung in unterschiedlichen Bereichen Entlastung in der Verantwortung für Mensch und Maschine um Vieles erleichtert werden. In Anlehnung an diese Informationen fokussiert sich diese Bachelorarbeit auf Drucklufttechnik und Kompressionsanlagen. Dabei wird auf die wichtigsten Inhalte in diesem Zusammenhang eingegangen, darunter die Entwicklung der Anlagen, sowie auch deren optimierte Konstruktion, mit ihrer Einbindung von Programmiersprachen wie Python. Dazu gehört die Gewährleistung einer vorausschauenden Wartung und Instandhaltung.

1.1. Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit „Zuverlässigkeitsanalyse und Optimierung von Kompressionsanlagen in der Industrie“ ist wie folgt aufgebaut: Zuerst werden die Einleitung, die grundlegende Motivation sowie die gewählten Hilfsmittel beschrieben, so dass dem Leser ein kurzer Überblick über die Arbeit verschafft wird. Zudem erfolgt eine kurze Einführung in die wichtigsten theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis der Arbeit unabdingbar sind und für eine technische Auskunft sorgen. Darauf folgt die Beschreibung der Funktionen und die Vorstellung des Systems für die Kompressionsanlagen. Auf die Arten Kompressionsanlagen wird im Einzelnen eingegangen und die einzelnen Fachbereiche werden vorgestellt. Hierbei werden die Vor- und Nachteile beschrieben, sowie die Anwendbarkeit im Einzelfall. Auf den inhaltlichen Teil und somit die Vorstellungen der einzelnen Kompressionsanlagen, folgen Optimierungsvorschläge. Anschließend wird am Ende ein Ausblick auf zukünftige Projekte gegeben

und in einem Fazit zusammengefasst. Literatur und Quellenverzeichnis, sowie ein Datenträger mit dem erstellten Programmsystem schließen die Arbeit ab. Konkretes Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit ist es, eine optimierte Kompressionsanlage zu entwickeln. Hierzu wurde ein Python-Programm geschrieben, in und mit dem die Wartung und die Instandhaltung überprüft und überwacht werden. Ausgearbeitete Ergebnisse liegen in vollem Umfang in dieser Thesis vor, sowohl in schriftlicher Form als Darstellung, als auch in tabellarischer und bildlicher Form. Auch ist das Programm als py-Datei auf einer beigefügten CD zu sehen. Somit wird mittels des CAD-Programms CATIA V5 eine verbesserte Anlage vorgestellt und modelliert, wobei der Keilriemen in einem konkreten Beispiel durch einen Kettentrieb, samt Zahnräder und Abdeckung dargestellt wird. Dieses Programm soll die Effektivität steigern und die Kosten senken, so dass ein Leerlauf vermieden und die Produktion nicht gestoppt wird, welche großen Auswirkungen auf die Produktivität des Unternehmens hat.

2. Physikalische technische Grundlagen

Nachdem die grundlegende Zielsetzung der Arbeit vorgestellt und die Vorstellung der verwendeten Hilfsmittel abgeschlossen ist, wird nun auf die theoretischen Grundlagen eingegangen mit Hilfe verschiedener Abbildungen. Hierzu werden einige grundlegende Begrifflichkeiten aus der technischen Mechanik zur besseren Verständlichkeit dieser Arbeit vorgeführt und erläutert. Diese physikalischen Angaben, sind für alle Anlagen als Grundlage vorauszusetzen.

2.1. Starrkörper Kinematik

Unter Starrkörper Kinematik versteht man ein System, welches aus unendlich vielen Massepunkten besteht (siehe Abbildung 1), die sich zueinander nicht ändern, und dies kann als Auffassung eines starren Körpers gesehen werden. (Gross et al. 2004, S. 188)

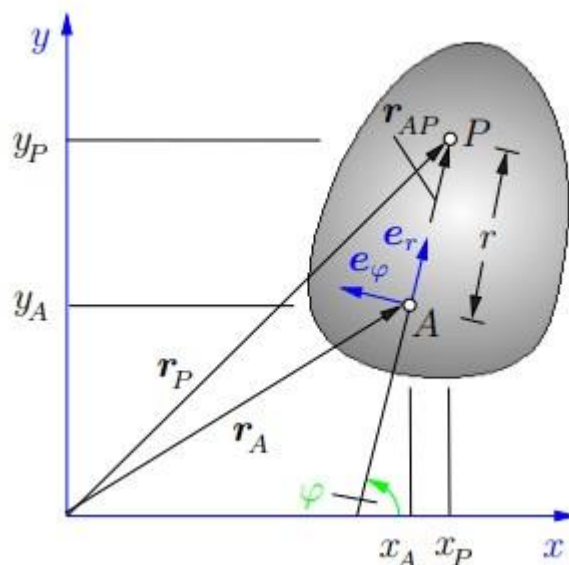


Abbildung 1: Starrkörper Kinematik
(Quelle: Gross et al. 2015, S. 125)

2.2. Freiheitsgrade

Die Freiheitsgrade repräsentieren die Anzahl der möglichen Bewegungen des starren Körpers in einem Raum (siehe Abbildung 2). Im dreidimensionalen Raum hat jedes Objekt sechs Freiheitsgrade. Je nach Freiheitsgrad besteht die Möglichkeit der

Translation in x-y- und z-Richtung. Außerdem gibt es einen Freiheitsgrad für jede mögliche Drehung um jede Achse. In der Ebene reduziert sich die Anzahl der Freiheitsgrade auf drei. Dazu sind zwei Translationsmöglichkeiten in x- und y-Richtung sowie Rotationsmöglichkeiten um die z-Achse möglich. Jedes mechanische System kann nach der Anzahl seiner Freiheitsgrade klassifiziert werden z.B. hat ein Zylinder fünf und eine Kugel drei Freiheitsgrade. Der Fachbegriff für eine gerade Linie der Freiheit ist im Englischen „Degree of Freedom“, abgekürzt „DOF“ (Gross et al. 2017).

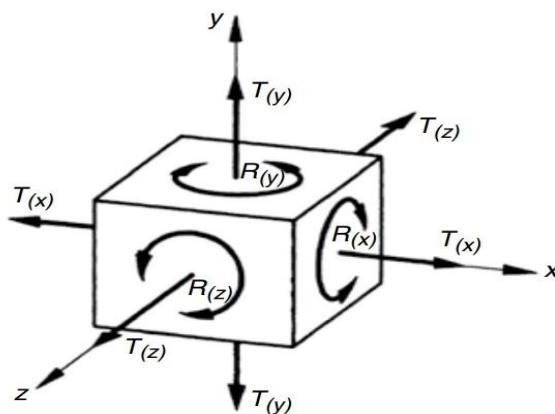


Abbildung 2: Freiheitsgrade

Quelle: (Böge und Böge 2021, S. 6)

2.3. Rotation

Sobald sich alle Punkte des Körpers um die gemeinsame Achse drehen, spricht man von einer Rotation siehe Abbildung 3. Hierbei differenziert die Rotation um raum- und zeitlich veränderliche Rotationsachsen. (Gross et al. 2017, S. 160)

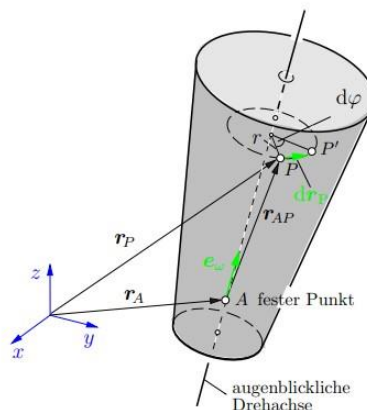


Abbildung 3: Rotation

Quelle: (Gross et al. 2015, S. 122)

2.4. Translation

Wenn ein Körper ohne Drehung verschoben wird, wirken auf alle Stellen eines Körpers die gleiche Geschwindigkeit, sowie die gleiche Beschleunigung. Winkelbeschleunigung des Körpers ist $\alpha = 0$ (siehe Abbildung 4). Die Punkte haben in der Zeit dt eine gleiche Verschiebung, da die Form der Bahnkurve der Punkte ist auch identisch.

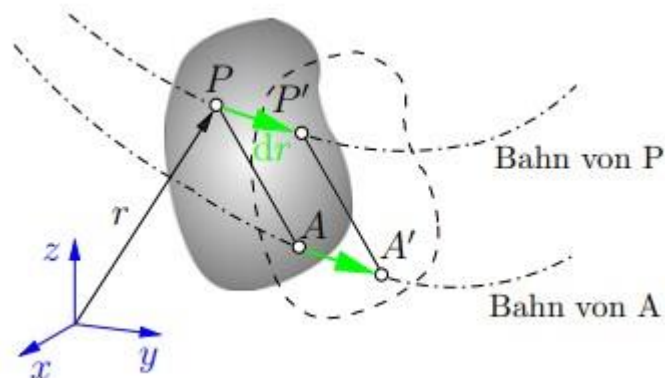


Abbildung 4: Translation
(Quelle: Gross et al. 2015, S. 121)

2.5. Allgemeine und komplexe Bewegung

Die allgemeine komplexe Bewegung, sowohl im zeitlich-als auch im dreidimensionalen Raum, ist die gleichzeitige, zusammengesetzte Bewegung aus Translation und Rotation (siehe Abbildung 5). Die Translation- und die Rotationsbewegungen eines Körpers sind unabhängig voneinander, wobei jede der beiden ohne die jeweils andere existieren kann.

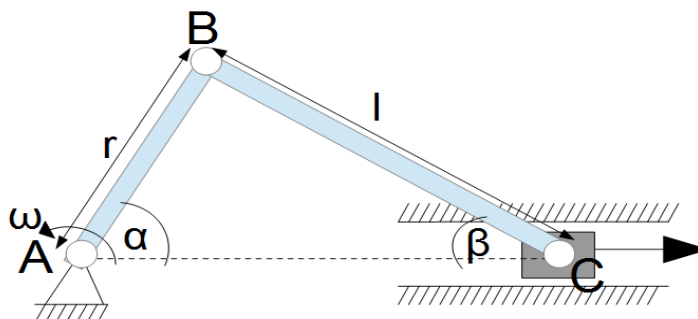


Abbildung 5: Allgemeine und komplexe Bewegung
(Quelle: <https://www.ingenieurkurse.de>)

2.6. Physikalische Drücke

Atmosphärischer Druck p_{amb} erzeugt sich durch Gewicht der Luft Umhüllung, welche auf uns wirkt. Er ist abhängig von der Dichte und der Lufthülle.

Überdruck $p_{\ddot{u}}$, ist der Druck über dem atmosphärischen Druck. In der Technik der Luft wird der Druck meist als übermäßigen Druck angegeben und das in Bar ohne den Index „ $\ddot{u}$ “. Absolut Druck p_{abs} , welche die Summe aus dem Druck aus der Atmosphäre Druck p_{amb} und dem Überdruck $p_{\ddot{u}}$ ist. (Bierbaum 2004).

2.7. Volumenstrom

Volumenstrom bezeichnet das Volumen (l oder m³) pro Zeiteinheit (Minuten oder Stunden) und stellt als $\dot{V}$ dar. Die Geschwindigkeit ist Abhängig von der Breite des Rohrquerschnittes. Dabei wird die S V_1 (Anfangsgeschwindigkeit) und die Endgeschwindigkeit V_2 bestimmt. Es wird unterschieden zwischen laminarer-Strömung und turbulente-Strömung (siehe Abbildung 6,7,8).



Abbildung 6: Laminare Strömung
(Quelle: Bierbaum 2004)



Abbildung 7: Turbulente Strömung
(Quelle: Bierbaum 2004)

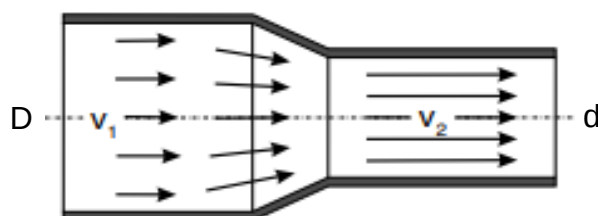


Abbildung 8: Querschnittsveränderung
(Quelle: Bierbaum 2004)

3. Stand der Technik

Zunächst wurde im Bereich der Kompressionsanlagen eine Recherche durchgeführt um einen vertieften Einblick, sowie den aktuellen Stand der Technik zu erhalten. Zweck dieser Recherche ist es, die Funktionen, Aufgaben, Vorteile und Nachteile von Kompressionsanlagen festzuhalten sowie die Methoden und Anwendungsbereiche darzustellen. Anhand dieser Daten, wird eine optimierte Kompressionsanlage durch die Programmiersprache Python dargestellt, so dass die Wartungsintervalle überwacht und im Voraus geplant werden können.

3.1. Unterschiede der Kompressionsanlagen

In diesem Kapitel werden zunächst die Unterschiede zwischen Turbokompressoren (siehe Abbildung 9) und Verdrängungskompressoren (siehe Abbildung 10) erläutert. Turbokompressoren liefern einen großen Druckluftstrom bei nur geringen Verdichtungsendrücken. Allerdings können die Turbokompressoren bis zu 400 bar im Hochdruckbereich arbeiten, während sich Verdrängungskompressoren durch geringen Durchsatz und hohe Verdichtungsendrücke auszeichnen. Kompressoren können auch in ölgeschmierte und ölfreie Kompressoren unterteilt werden. Im Bereich der Kältetechnik gibt es außerdem vollhermetische, halbhermetische und offene Verdichter. Bei einem hermetischen Kompressor stehen Motor und Kompressor in direktem Kontakt mit ihren jeweiligen Kältemitteln in einem speziell abgedichteten Gehäuse. Halbhermetische Kompressoren, zeichnen sich dadurch aus, dass der Motor am Kompressionsgehäuse befestigt ist. Offene Kompressoren werden über Riemen, Zahnräder oder Getriebe angetrieben. In der Kraftfahrzeugtechnik z.B. in Werkstätten, werden meist die offenen Kompressoren zum Einsatz gebracht. Diese werden mit Öl getrieben, das Öl wird für die Anlage gleichzeitig zum schmieren der Anbauteile wie z.B. Schlagschrauber genutzt. Des Weiteren hat das Öl weitere Funktionen wie Kühlen, Abdichten und Dämmen. Schraubenkompressoren werden nicht geschmiert, der Verdichtungsraum bleibt somit trocken. Bei diesem System haben wir einen hohen Wirkungsgrad.



Abbildung 9: Turbokompressor
(Quelle: BOGE.com)

Für die Überwachung und Steuerung des Systems werden Sensoren zum Einsatz gebracht, die die Temperaturen und Drücke überwachen. Diese haben auch den Zweck, dass die Wartungen regelmäßig überwacht und durchgeführt werden, somit werden auch Standzeiten vermieden. Bei der Abbildung 11 ist zu sehen, dass der Antrieb mit einem Riemen erfolgt. Ein Elektromotor ist zugeschaltet, um das System anzutreiben dabei wird der Antrieb durch einen Kurbeltrieb mit Kurbelwelle und Pleuelstangen erzeugt. Beim Aufbau ist zu erkennen, dass es sich um einen Zylinder handelt der für den Druckspeicher im Tank sorgt. Es kann auch eine direkte Zuschaltung ohne einen Keilriemen stattfinden dafür mit einem direkt geschalteten Elektromotor. Der Tank ist individuell für den Nutzgebrauch frei wählbar, so dass bei geringem Verbrauch ein kleines Tankvolumen gewählt werden kann, um Platz und Anschaffungskosten zu sparen. Der Tankinhalt ist mit 17,5l7s ausgelegt, hinzukommt, dass der Elektromotor einen Antrieb mit mindestens 50Hz aufweist (Rothe 1994, S. 11–15).



Abbildung 10: Kompressor ohne Keilriemen
(Quelle: Eigene Darstellung)



Abbildung 11: Kompressor mit Keilriemen
(Quelle: Eigene Darstellung)

Die Druckbereiche sind individuell je nach Kompressoren gestuft. Daher ist es hierbei wichtig die Anwendungen und die dafür geeignete Arbeitsschritte auszuwählen. (Bierbaum 2004).

3.1.1. Hubkolbenkompressor

Die Hubkolbenkompressoren, enthalten mehrere Zylinder mit paarweise auf einer gemeinsamen Achse angeordneten Kolben, die über ein ihre Kolbenstangen verbindendes Joch mit einem Gleitstück gekoppelt sind. Das Gleitstück ist über lineare Wälzlager zwischen zwei parallelen Führungsflächen des Jochs quer zur gemeinsamen Achse beweglich geführt und auf einem Kurbelzapfen einer Antriebswelle gelagert. Das Joch ist durch zwei voneinander getrennte, je mit einer der Kolbenstangen verbindbaren Gleitschuhen und einen diese umgebenden, elastisch verformbaren Spannring gebildet. Durch die auf die Gleitschuhe aufsetzbaren Spannrings werden die Gleitschuhe mit einer vorbestimmten Anpresskraft über die Wälzlager gegen das Gleitstück verspannbar, wodurch eine stoßfreie Übertragung der Antriebskräfte erzielt wird. Dieses ist insbesondere für Kleinkompressoren geeignet (Mohrig 1988, S. 23–27).

Die Anordnungen von Hubkolbenkompressoren sind in verschiedenen Ausführungen möglich, diese sind in Abbildung 12 dargestellt.

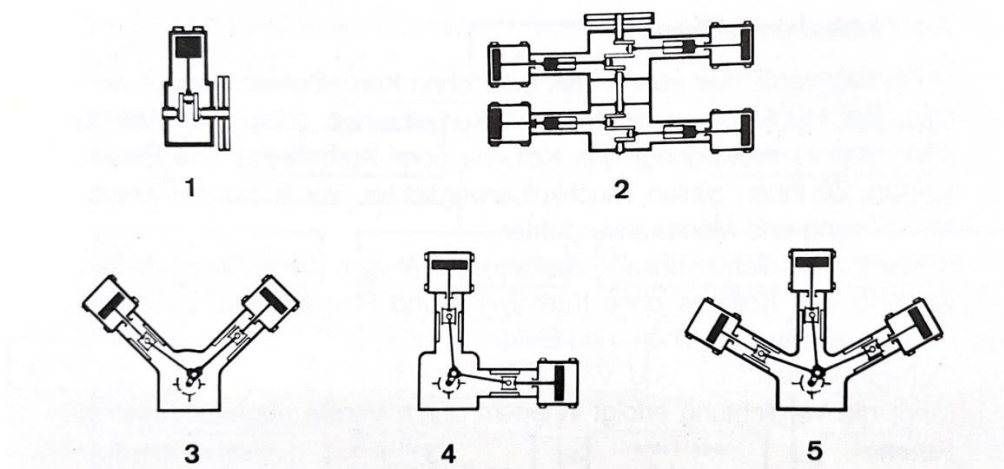


Abbildung 12: Anordnungen der Hubkolbenkompressoren

(1. Vertikal, 2. Boxeranordnung, 3. V-Anordnung, 4. L-Anordnung, 5. W-Anordnung)

(Quelle: Mohrig 1988, S. 24)

Die Anordnungen, werden je nach Anwendung der gebrauchten Vorteile und Strömungen gewählt. In der Regel, wird die Winkelbauart bei Hubkolbenkompressoren bevorzugt. Es können Drücke bis zu 1000 bar erzielt werden. Die Zwischenkühlung die vorher verdichtet wird, wird im nächsten Takt zugeführt somit erreicht man die erwarteten hohen Drücke im System. Die Hubkolbenkompressoren, werden in drei Varianten

ausgeführt, die man durch die Leistung bzw. Einsatzmöglichkeiten anhand der Leistung wählen kann.

3.1.2. Membrankompressor

Der Membrankompressor gehört zu den Verdrängerverdichtern. Membrankompressoren neigen dazu, etwas lauter zu sein als ein Kolbenkompressor-, einfach, weil die Kompression von einem mechanischen Teil durchgeführt wird, das hörbarer resonant ist als die Kolbenmembran eines anderen Kompressorsatzes. Dieser besteht meist aus elastischem Kunststoff und wird von einem Elektromotor auf und ab bewegt, der als Medium Luft verdichtet. Für diese Kompressor-technologie verwendet man normalerweise keinen Boiler, um Luft vorübergehend zu speichern. Daher arbeitet das Gerät ohne Unterbrechung. Dadurch entsteht eine Erwärmung, die meist durch entsprechende Sensoren gesteuert und überwacht wird. Bei Überhitzung wird der Antriebsmotor abgeschaltet, um Beschädigung sowie erweiternde Schäden zu vermeiden. Die Unterbrechung, wird fortgesetzt, indem die Temperatur wieder sinkt. Diese liegt immer einige Grad unter der sogenannten Hystereseschwelle. Diese bewirkt, dass das Gerät nicht gleich wieder nach kürzester Zeit abschaltet, sondern eine gewisse Laufzeit ermöglicht wird. Oft wird neben der Membran noch ein Ventilationssystem durch den Elektromotor angetrieben, welches für die nötige Kühlung sorgt. Dies erhöht neben der Lebensdauer der elektrischen Einheit die Laufzeit zwischen den Abschaltungen. Je nach Außentemperatur kann der Airbrush-Kompressor daher also auch durchaus dauerhaft liefern, ohne überhaupt abzuschalten. Membrankompressoren sind in den meisten Fällen ölfrei, daher entfällt auch die Wartung. Je nach Preisklasse liegt das Hauptmerkmal auf der Lebensdauer der Membran. Sollte diese defekt sein, bleibt nur der Gang zur Werkstatt bzw. das Rufen des Technikers (Bierbaum 2004, S. 29). Die Eigenschaften sind unter anderem der große Zylinderdurchmesser sowie der kleine Hub am Kolben. Darüber hinaus ist dieser Verdichter wirtschaftlich bei kleinen Liefermengen, niedrigen Drücken und beim Erzeugen von einem Vakuum. Ferner ist der Membrankompressor auch ein ölfreier Kompressor, der nach dem Verdrängungsprinzip arbeitet, bei dem anstatt des Hubkolbens eine elastische Membran für die Dichtigkeit sorgt. Die Membran kann mechanisch sowie hydraulisch quitiert werden. Die mechanische Bestätigung sieht wie folgt aus: Der mit der Antriebswelle des Kompressors verbundene Exzenter wird von zwei Schütz-Scheiben mit einer von einem Pleuel

gehaltenen Membran angetrieben. Die hydraulische Bestätigung folgt, indem die Membran durch einen auf die Niederdruckseite der Membran wirkenden wechselnden Hydraulikdruck bewegt wird. Die Kolbenpumpe erzeugt den Hydraulikdruck. Die Kolbenstange, welche mit dem Kreiskopf verbunden ist, treibt den druckerzeugenden Kolben an. Membrankompressoren mit mechanischer Bestätigung sind nur für kleine Fördermengen, Niederdruck- und Vakuumaufgaben geeignet. Hydraulisch angetriebene Maschinen sind ideal zur Erzeugung von Hochdruck (Bahr und Ruppelt 2000). (vgl. Copoco 1975, S.90) . Durch die hermetische Abdichtung des Arbeitsraumes (zwischen fest eingespannter Membran und Deckel) sind Membrankompressoren ebenfalls in der Lage, schmierfettfrei abzudichten. Der Hauptvorteil ist die Abgeschlossenheit gegenüber der Umgebung und die Verhinderung einer Kontamination des Fördermittels. Die Membran besteht hauptsächlich aus mehreren Lagen Stahl und befindet sich zwischen den Kappen, die auch die Ventile und Anschlüsse für die Druck- und Saugleitung enthalten. Loch- bzw. Sitzplatte sind dicht eingespannt und sind als Verdränger eines der wichtigsten Funktionselemente. Überschüssiges Öl wird während des Druckhubs durch ein einstellbares Entlastungsventil zum Kurbelgehäuse zurückgeführt. So wird ein Teil der Verdichtungswärme durch die umlaufende Ölmenge abgeführt. Die Membran wird zwischen der Platte, die die Ventile und Armaturen der Druck- und Saugleitung enthält, und der Lochplatte, die den Kompressionsraum im unteren Teil begrenzt, festgespannt (siehe Abbildung 13). Mehrlagige Membranen erhöhen die Bruchsicherheit. Für kleine Kompressoren werden Viton-Kunststoffmembrane oder teflonbeschichtete Neoprenmembrane verwendet, die normalerweise mit Stützscheiben verstärkt sind. Die Lebensdauer der Membranen liegt in der Regel zwischen 1500 und 4000 Betriebsstunden (Mohrig 1988, S. 30). Membrankompressoren sind aufgrund des Förderstroms bis etwa $100 \text{ m}^3/\text{h}$ begrenzt. Es werden jedoch einstufige Drücke bis etwa 2,5 MPa, zweistufig bis etwa 25 MPa und dreistufig bis 100 MPa erreicht. Sowohl reine Luft als auch Gasgemische, aggressive, giftige und Edelgase werden sauber in Membrankompressoren verdichtet, mit Verwendung entsprechender Werkstoffe. Für die Sauerstoffverdichtung wurde eine Variante mit separatem Hydraulikkreislauf für Wasser entwickelt. Dadurch entsteht eine zusätzliche Trennung zwischen den Öl- und wasserführenden Teilen, so dass eine hohe Sicherheit gewährleistet ist. Auch kleine Luftkompressoren sind weit verbreitet, meist Ein oder Zweizylinder-Monoblöcke mit Membranen, die direkt über einen Kurbeltrieb bewegt werden. Die Membrane

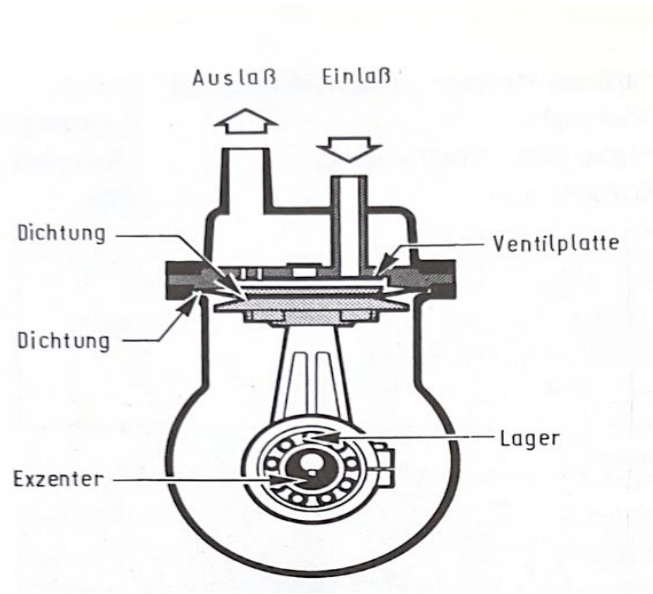


Abbildung 13: Membrankompressor
(Quelle: Mohrig 1988, S. 30)

3.1.3. Freikolbenkompressor

Der Freikolbenkompressor gehört zu der Bauart der Verdrängerverdichtern. Bei diesem System handelt es sich um einen mit einem Zweitaktdieselmotor zusammengebauten Verdichter. Dieses System arbeitet ohne einen Kurbeltrieb und ist eine Sonderbauart des Hubkolbenverdichters. Die Druckluft wirkt auf die ausgefahrenen Kolben, wirft sie nach innen und lässt den Kompressor anlaufen, wobei die Druckluft 150-200 bar erreicht. Durch den Verdichtungstakt-, wird Kraftstoff eingespritzt und die Verbrennung findet statt. Durch die Verbrennung, wird ein zunehmender Druck auf den Kolben ausgeübt, dieser Druck funktioniert als Arbeitstakt weiter und das verbrannte Luftkraftstoffgemisch wird durch die Öffnung wieder in das Auslassventil durchgelassen. Die verdichtete Verbrennungsluft im Motorzylinder ergibt dann wieder den Spalt der Kolben, wenn der Kraftstoff eingespritzt wird. Somit wird die eingeschlossene Luft verdichtet. Nach Abzug der erforderlichen Spülluft wird der Großteil der komprimierten

Luft über ein Überdruckventil abgelassen. Den Rest werfen die Kolben für einen Arbeitszyklus nach innen. Die Saugventile saugen wieder neue Luft an. Der Freikolbenverdichter zeichnet sich dadurch aus, dass dieser einen hohen Wirkungsgrad erzeugt. Außerdem zählen zu den Vorteilen der erschütterungsfreie Lauf. Das System weist ein einfaches Prinzip auf, wird jedoch selten verwendet. In der Praxis sind die Kolbenbewegungen zu synchronisieren und umfangreiche Steuerungen vorzusehen, wodurch qualifizierte Arbeitskraft von Nöten ist. Dieses ist in der Praxis schwer realisierbar, da qualifizierte Arbeiter auf dem Markt derzeit selten sind und somit Firmen, die mit diesem System arbeiten, auf diese angewiesen sind (Bierbaum 2004, S. 30). Während der Auswärtsbewegung der Kolben werden die Gase und Spülluftschlitze im Zylinderabschnitt des Motors freigegeben und der „Spülluftansaugraum“ mit Frischluft gefüllt. Die Bewegung des Kolbens komprimiert die eingeschlossene Luft, sodass der eingespritzte Kraftstoff das Gemisch entzündet und ein neuer Zyklus beginnt. Da die Kolben in eine Richtung arbeiten, hat der Kompressor einen perfekten Massenausgleich und einen vibrationsfreien Betrieb. Die Verdichterkolben werden im Durchmesser abgesetzt. Dies gibt Ihnen zwei Druckstufen und vier Druckstufen auf jeder Seite. Die Verdichtungsräume werden von einer Ölpumpe mit Schmiermittel versorgt, die mit einem Steuerritzel gekoppelt ist. Hinter jeder Verdichterstufe ist ein Kühler angeordnet: Motor, sowie Verdichter und Kühler sind wassergekühlt. Kompressoren können als einzelne Einheiten von Antriebssystemen oder Gehäusen untergebracht werden. Für größere Luftmengen sind 2 oder 4 Maschinen in einem Behälter montiert erhältlich. Bei einem elektrischen Schwenkkompressor erfolgt der Antrieb über einen elektrischen Hubmagneten. Der Kolben ist entweder direkt mit dem Anker oder mit dem Übertragungselement verbunden und bewegt sich elektromagnetisch hin und her (siehe Abbildung 14). Diese Konstruktion wird in der Praxis selten verwendet. Drehkolbenverdichter sind ventillose ein- oder mehrachsige Verdrängermaschinen mit Rotationskolben. Während Wälzkolbenverdichter gegen Staudruck im Leitungsnetz Druck aufbauen, haben alle anderen Rollkolbenverdichter fest installierte Druckübersetzer. Seine Größe hängt von dem Umschlingungswinkel ab, der durch die Einlass- und Auslasskanäle gebildet wird. Die wichtigste Maschine der Einwellen-Rotationskolbengruppe zur Drucklufterzeugung ist der Drehschieberverdichter (Mohrig 1988, S. 31–32).

- a) Druckluftauslass-Öffnung
- b) Einlass-Öffnung

- c) Kraftstoffeinspritzdüse
d) Abluft-Öffnung

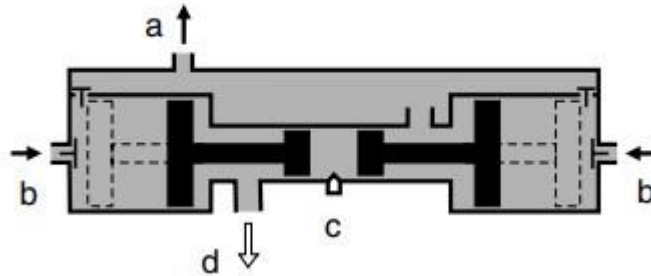


Abbildung 14: Freikolbenkompressor
(Quelle: Druckluftkompendium)

3.1.4. Vielzellenkompressor

Der Vielzellenkompressor gehört zu den rotierenden Verdrängermaschinen. Im exzentrisch gelagerten Rotor sind flexible Schieber eingebaut, die durch Fliehkraft gegen die Gehäusewand drücken. Das Druckgehäuse und die darin befindlichen rotierenden Kolben bilden den Nutzraum, um das Druckmedium anzusaugen und zu verdichten. Der exzentrisch gelagerte zylindrische Rotor dreht sich in einem geschlossenen Gehäuse. Der Rotor ist mit radialen Längsschlitz versehen. In den Schlitz bewegen sich Schieber in radialer Richtung. Ab einer bestimmten Drehzahl des Rotors werden die Schieber durch die Zentrifugalkraft nach außen gegen die Innenwand der Umgebung gedrückt. Der zwischen Rotor und Gehäuse liegende Verdichtungsraum unterteilt sich durch die Schieber in einzelne Zellen. Aufgrund der exzentrischen Anordnung des Rotors nimmt die während einer Umdrehung zu oder ab. Die Druckräume werden durch eingespritztes Öl geschmiert. Durch Einspritzen großer Ölmengen in den Verdichtungsraum wird neben der Schmierung auch die Kühlung und Abdichtung der Gleitbahnen erreicht. Das eingeführte Öl kann man nach der Verdichtung aus dem Luft- bzw. Ölgemisch wieder herausfiltern und in den Ölkreislauf zurückführen (siehe Abbildung 15). Die Eigenschaften hierbei sind unter anderem der sehr ruhige Lauf des Verdichters und der geringe Platzbedarf, sowie die einfache Wartung der Maschine. Die Drücke, welche dieser Verdichter aufbringen kann, reichen bis zu 9 bar, die Volumenströme bis zu 18 m³/min. Ein weiterer Faktor ist die stoßfreie und gleichmäßige Förderung der Luft. Lediglich die hohen Instandhaltungskosten durch den Verschleiß

der Schieber stellen hierbei den Nachteil des Vielzellenkompressors dar (Bierbaum 2004, S. 31).

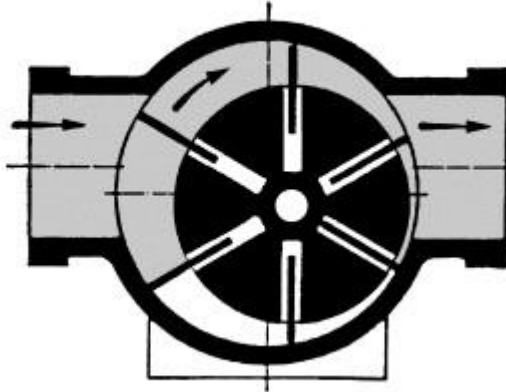


Abbildung 15: Vielzellenkompressor
(Quelle: Bierbaum 2004, S. 31)

3.1.5. Flüssigkeitsringkompressor

Die Funktion des Flüssigkeitsringkompressors sind dieselben wie beim Drehschieberverdichter. In der Regel sind die Flüssigkeitsringkompressoren Einwellen-Rotationsverdichter, was sehr speziell ist. Die wesentlichen Komponenten der Anlage sind Gehäuse, das zentral angeordnete Laufrad und die Sperrflüssigkeit. Als Sperrflüssigkeit wird in aller Regel Wasser benutzt. Während bei Drehschieberkompressoren einige Kolben ihre Position umändern, so dass dadurch unterschiedlich große Kammern gebildet werden, übernimmt bei Flüssigkeitsringkompressoren diese Funktion die Sperrflüssigkeit. Durch die schnelle Drehung des Laufrades wird es in Rotation versetzt, wodurch sich an der Wand des Gehäuses ein Wasserring bildet. Dieser Ring aus Wasser bildet zusammen mit den Flügeln unterschiedlich große Kompressionskammern, durch die die Saugflüssigkeit verdichtet werden kann. Bei den Flüssigkeitsringkompressoren haben wir einen niedrigen Wirkungsgrad (Mohrig 1988, S.34). Durch den fest eingebauten Druckregler wird die Arbeit ventillos nach dem Verdrängungsprinzip verrichtet. Ein stabiler Flüssigkeitsring bildet sich der durch Zentrifugalkraft gegen das Gehäuse gedrückt wird, sodass durch den Innendurchmesser an der engsten Stelle zwischen Gehäusewand und Schaufelrad die Radnabe berührt wird und diese dadurch abdichtet wird. An der Stirnseite der Maschine liegen die Öffnungen, um den Luft Ein- und Auslass zu gewährleisten. Das aus dem Druckschlitz

ausströmende Gas wird verdichtet durch die exzentrische Lage des Schaufelrades. In der Regel baut man doppelwirkende Maschinen ein, um ungünstige freigesetzte Radialkräfte-, zu verhindern, die bei großen Volumenströmen zustande kommen. Eine Umdrehung eines Schaufelrades bewirkt zwei Verdichtungsvorgänge. Ein höheres Druckgefälle entsteht, welches das Stufendruckverhältnis sichtlich verringert. Diese Maschinen werden aus diesem Grund nur für niedere Drücke eingesetzt und eingestellt. Flüssigkeitsringkompressoren haben ölfreie Verdichtungsräume. Die komprimierte Luft wird in aller Regel mit Wasser gekühlt (siehe Abbildung 16). Die Kühlung findet während des Komprimierungsprozesses statt. Aufgrund der Tatsache, dass die Flüssigkeit ständig mit dem Gas zusammen entweicht, muss ständig eine bestimmte Flüssigkeitsmenge zugeführt werden, um einen reibungslosen Arbeitsgang zu gewährleisten und das System zu kühlen. Die Verdichtungs-Endtemperatur wird durch die direkte Kühlung niedrig gehalten. Sie liegt nahezu bei der Eintrittstemperatur des zu verdichtenden Mediums. (Mohrig 1988, S.35). Für den dichtenden Flüssigkeitsring bzw. für die Kühlflüssigkeit, kann Wasser und fast jede andere Flüssigkeit verwendet werden. In der chemischen Industrie werden häufig Basen, Säuren oder Salzlösungen mit einem hohen Siedepunkt als dichtende bzw. kühlende Flüssigkeit verwendet, wodurch man ein hohes Vakuum erzielt (Faragallah 1989, S. 50-57). Flüssigkeitsmaschinen berücksichtigen in den meisten Anwendungen ein Arbeitsraum pro Wellenumdrehung. Große Volumenströme führen zu ungünstigen Wellen und Lagerabmessungen, aufgrund der auf die Welle wirkenden Radialkräfte und der erforderlichen großen Geometrien. Durch das Vorsehen von zwei parallelen Arbeitskammern verdoppelt sich der Druckgradient innerhalb der Maschine nahezu bei jeder Umdrehung. Angesichts des erhöhten Permeabilitätsverlustes und der damit verbundenen Reduzierung, sind diese Maschinen nur für wenige Anwendungen mit relativ niedrigen Druckverhältnissen einsetzbar. (vgl. technisches Handbuch Verdichter; Dr. Ing. Hans Bender; S.234;1997). Technischer Aufbau des Flüssigkeitsverdichters entspricht ebenfalls den einstufigen Flüssigkeitsvakuumumpumpen, hierbei entfällt jedoch wegen einer zu hohen technischen Belastung der Einsatz von Ventilen vor dem Druckschlitz. Die Gas Art bestimmt die zu wählenden Betriebsflüssigkeiten. Zur Förderung von Luft wird Wasser eingesetzt. Dies gilt auch zur Förderung von Azetylen und feuchtem Chlorgas. Bei trockenem Chlorgas wird konzentrierte Schwefelsäure benutzt. Der Antrieb von Flüssigkeitsringkompressoren

erfolgt fast ausschließlich durch Drehstrom-Asynchronmotoren (Vgl. Dr. Ing. Hans Bender; S.236; 1997) (Segebrecht 1994, S, 124).

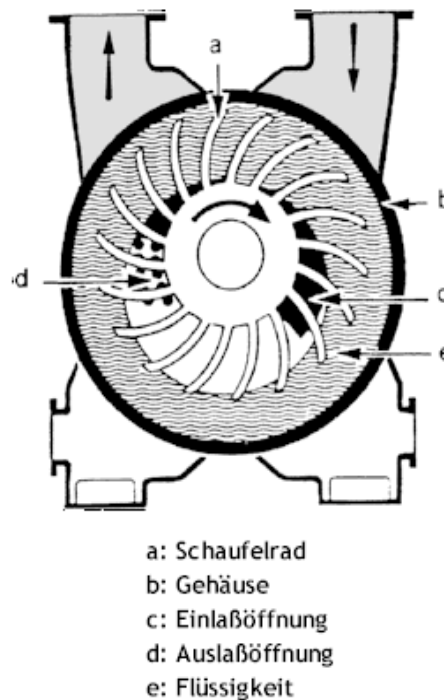


Abbildung 16: Flüssigkeitsringkompressor
(Quelle: Bierbaum 2004; Mohrig 1988)

3.1.6. Schraubenkompressor

Der Schraubenkompressor schließt Umgebungsluft zwischen zwei ineinandergreifenden Rotoren ein. Während diese eingeschlossene Luft durch die Rotoren strömt, wird deren Volumen verringert. Auch wird diese Art der Kompressoren wegen ihres volumenartigen Arbeitsprinzips der Gruppe der Verdränger Maschinen zugeordnet. Diese zeichnen sich zudem durch einen gekapselten Arbeitsraum und ein zyklisch wiederkehrendes Arbeitsspiel aus. Schraubenkompressoren gehören ferner aufgrund ihrer rotierenden Kinematik zu den Rotationsverdränger Maschinen (Utri 2021, S. 3). Einsatzgebiete der Schraubenkompressoren sind unter anderem Drucklifterzeugung, sowie Verdichtung großer Mengen Kältemitteln und Prozessgasen. Neben dem Kompressor Konzept ist es auch möglich, die Schraubenmaschine durch Umkehrung der Kinematik und Strömungsrichtung als Schraubenexpander zu betreiben. Nicht nur zur Herstellung elektrischer Energie werden diese eingesetzt, sondern können auch zur Nutzung industrieller Abwärme in ORC- oder CRC-Kreisläufen verwendet werden. Da die Abmessungen des Schneckenexpanders an das vorhandene Abwärmepotential

angepasst werden müssen, werden die Schneckentypen in der Regel nicht in Serie produziert. An deren Stelle werden hier oft bereits Kompressor Konzepte verwendet und erweitert. Zwei in axialer Richtung aufeinander folgende Profilzähne des Hauptrotors und des Rotors bilden einen ineinander übergehenden Profilluftspalt. Das ist der Arbeitsraum. Dem Druckstutzen zugewandt drehen sich die beiden Läufer aufeinander zu. Vor dem Druckstutzen drehen die Läufer auseinander. Die Drehung öffnet einen leeren Profilraum auf der Saugseite und bei weiterer Drehung platzt dieser Profilraum bis zu einem Maximum auf. Hier wird die Saugseite des Spaltes in axialer Richtung geschlossen und so hält der auf der Laibungsseite axiale Boden-, den so gebildeten Raum geschlossen. Auf der Saugseite ist der offene Zwischenraum des Profils mit gasförmigem Fluid gefüllt. Nach einer erneuten Drehung stehen die Zähne des hinteren Profils vor dem geschlossenen Teil des Eingangsgehäuses in der axialen Stirnfläche. Der Raum zwischen den Profilen ist geschlossen und mit Gas gefüllt. Fortsetzung der Rotation vollzieht dann die reinste Transportphase, bis die hinteren Profilzähne des gebildeten Zwischenraums einrasten. Dreht man weiter, so ist der Abstand zwischen den Profilen durchgehend (siehe Abbildung 17). Der Profileingriff wandert zum Druckanschluss, sodass eine innere Kompression des geschlossenen Volumens stattfindet. Der Leerraum des Profils erreicht die Ausgangssteuerkanten (Konka 1988, S. 5). An diesem Punkt ist die interne Komprimierung abgeschlossen und das Volume wird auf den angegebenen Wert komprimiert. Streichen die Spitzen der Zähne die Auslass-Steuerkanten, so öffnet sich der Lückenraum zur Auslassöffnung; das komprimierte Volumen wird in den Druckstutzen weitergeleitet. Beim Schraubenkompressor sind die Arbeitstakte wie auch beim Hubkolbenkompressor folgende Arbeitstakte: das Befüllen, das Transportieren, das Komprimieren, das Ausschieben (Konka 1988, S. 7). Die Öleinspritzkühlung verwendet Öl nicht nur als Schmiermittel, sondern auch als Kühlmittel. Sie wird bei Schrauben- und Vielzellenkompressoren eingesetzt. Man bezeichnet dieses System auch als inneres Kühlsystem, da dank der Öleinspritzkühlung und der großen Wärmeaufnahmefähigkeit von Öl es möglich ist, durch einstufige Verdichtung mit Kompressoren ohne Zwischenkühlung Verdichtungsenddrücke von bis zu 15 bar wirtschaftlich zu erreichen. Die Temperatur beim Verdichten beträgt dabei nur ca. 80 °C. Das beigefügte Öl wird in einem nachgeschalteten Ölabscheider wieder von der Druckluft getrennt. Besonders zu erwähnen sind bei Kompressoren mit Öleinspritzung der niedrige Energiebedarf und die Tatsache, dass durch das Öl eine

Art Luftwäsche entsteht, die in der Ansaugluft enthaltene aggressive Stoffe entfernt. Somit wird zwar eine Alterung des Öls hervorgerufen, Schraubenkompressoren können aber mit synthetischen Ölen Intervalle erreichen, die oft weniger durch die Technik, sondern bereits weit vorher durch die Gesetzgebung begrenzt werden. So ist in Deutschland vorgeschrieben, dass Öle mindestens einmal jährlich zu wechseln sind. Das heißt, die Höchststandzeit für ein Öl beträgt in Deutschland gesetzlich bedingt 8760 Stunden (Bahr und Ruppelt 2000, S. 46). Um den Einsatz in Serien von Schraubenrotoren in der Automobilindustrie zu erschaffen, müssen kostengünstigere Alternativverfahren entwickelt und qualifiziert werden. Für diese Herausforderung bietet eine umformende Fertigung der Anbauteile mit breitem Spektrum an Verfahren wegen der hohen Flexibilität und des geringen Materialverbrauchs eine interessante und durchaus wirtschaftliche Alternative. Die größte Schwierigkeit, ist die Einhaltung der Toleranzen. Ziel eines Kooperationsprojektes ist es daher, die Wechselwirkungen zwischen den Umformprozessen und der Maschine zu untersuchen (VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt 2010, S. 55). In letzter Zeit wurden verschiedene Umformverfahren zur Herstellung von Umformwendelbauteilen untersucht. Beispielsweise wurden mit dem Verfahren des hydrostatischen Strangpressens Stangen mit schräg Verzahneter mit Stahl gefertigt. Auch werden spiralförmige

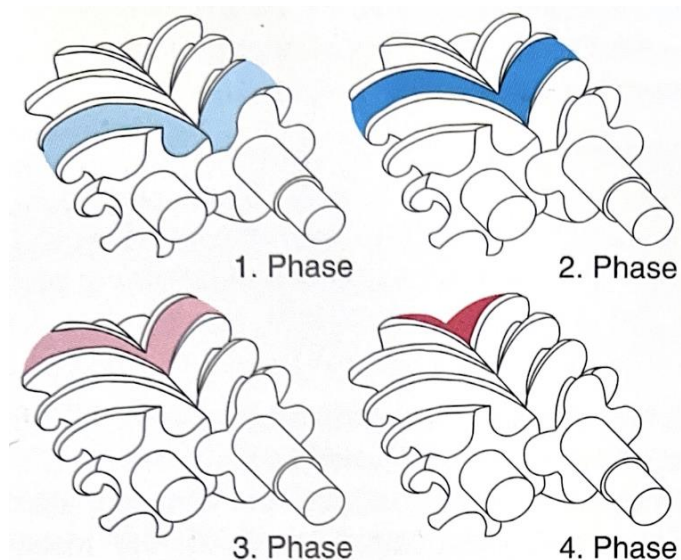


Abbildung 17: Schraubenkompressor

(Quelle: Rothe 1994, S. 19)

Schraubenrotoren aus Aluminium durch Strangpressen hergestellt. Im Bereich des Kaltfließpressens sind Untersuchungen zur Herstellung von schrägverzahnenden Zahnrädern durchgeführt worden. Diese genannten Verfahren zeichnen sich durch die

Anwendung von Pressmatrizen mit innerer Verdrehung aus. Eine systematische Untersuchung und Erforschung der angewandten Verfahren finden sich in der Literatur nur stark begrenzt wieder. Weiterhin könnte für diese Zielsetzung das konventionelle Tordieren stranggepresster Aluminium-Profile eine weitere Alternative zur Herstellung von schraubenförmigen Profilen darstellen. Dieses Verfahren wurde bislang eher zur Herstellung von beispielsweise Kurbelwellen oder Schiffsschrauben angewandt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird die Eignung der genannten Verfahren „Internes Tordieren beim Strangpressen“ sowie das „Kaltverdrehen“ zur Herstellung von Schraubenrotoren untersucht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Umformtechnik vergleichsweise kostengünstige, aber auch flexible Alternativen zur Herstellung derartiger Bauteile bietet (siehe Abbildung 18). Dabei ermöglichen die ermittelten Toleranzen beim konventionellen Tordieren eine geringfügige spanende Nachbearbeitung, um die

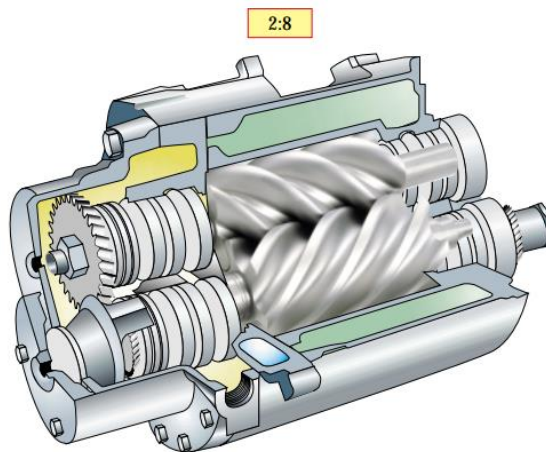


Abbildung 18: Schraubenkompressor
(Quelle: Böge und Böge 2016, S.19)

Endgeometrie zu erzeugen, was auch eine Reduzierung der Fertigungskosten bedeutet. Während des Prozesses der inneren Torsion zeigte sich, dass der Torsionswinkel immer noch klein blieb, aber die Kontur des Profils verbessert wurde. Bei einem direkten Vergleich der beiden Methoden können sich die Anforderungen an die Profilgeometrie widersprechen. Beim Tordieren beim Strangpressen ist ein kleineres Profil mit schmalen Zähnen vorteilhaft. Bei konventioneller Torsion hingegen sollte die Geometrie möglichst stark und die Verzahnung möglichst flach sein. Eine Kombination beider Verfahren könnte die erreichten Grenzen hinsichtlich des Steigungswinkels deutlich erweitern (VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt 2010, S. 65–66).

3.1.7. Roots-Verdichter

Ein Roots-Verdichter arbeitet mit zwei symmetrischen Kolben und dabei wird Antrieb durch einen Elektromotor bereitgestellt. Die beiden Kolben rotieren gegenläufig berührungsfrei und sind dabei in einem Gleichlaufgetriebe verbaut (Saug- u. Druckseite). Die Luft (Gase)-, wird verdichtet von der Saugseite und wird in die Verdichtungskammer weitergeleitet. Sie sind in einem Hohlraum zwischen Flügel und Körper eingeschlossen (Abbildung 19). Durch den Kolben, der die Druckseite freigibt, strömt das Gas in den Druckraum. Während sich die Schaufeln weiterdrehen, wird der Inhalt der Pumpkammer unter vollem Gegendruck weiter komprimiert. Falls der Kompressor keinen konstanten Druck aufweist, arbeitet dieser infolgedessen mit einem Staudruck. Daraus resultieren während einer Umdrehung der Welle vier Verdichtungsvorgänge (zwangsläufige Förderung). Roots-Verdichter sind für geringere Drücke geeignet. Es können unterschiedliche Druckverhältnisse bei unterschiedlicher Stufung erzeugt werden. Für das System ist keine Schmierung notwendig, somit ist das Gas ölfrei. Die Nachteile sind Staub oder Sand, dieses kann das System und den Ablauf stören und größere Schäden bewirken. Das Gehäuse kann durch Kühlflüssigkeit oder Luft abgekühlt werden. Die Roots-Verdichter gehören zu den rotierenden Verdrängerverdichtern. Die Einsatzmöglichkeiten des Roots-Verdichters sind weit gefächert, z.B Kraftfahrzeugtechnik und in der Produktion. (Mohrig 1988, S. 38–40) (Bierbaum 2004, 25, 34).

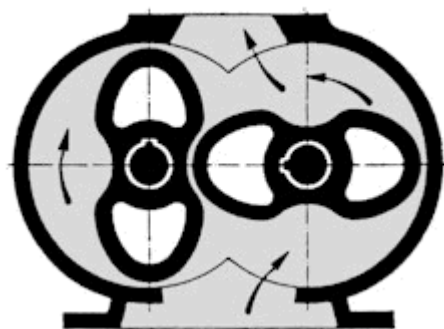


Abbildung 19: Roots-Verdichter
(Quelle: Bierbaum 2004, S. 34)

3.1.8. Axialverdichter

Der Axialverdichter, ist besonders für große Volumenströmungen geeignet diese können schon bei niedrigem Drücken bis $1200000 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht werden. Luft wird zuerst beschleunigt und dann komprimiert dieses passiert in Axialrichtung. Die Statorschaufel ist von rostfreiem Stahl und mit einer Oberflächengüte bearbeitet (siehe Abbildung 20). Die Liefermenge, kann m^3/s betragen, dass ist die Mindestliefermenge, die die Anlage ausführen kann. Axialverdichter, können auf Grund der kleinen Durchmesser der Schaufeln höhere Drehzahlen erreichen. Die Anlage kann mit geringem Drücken dauerhafte Liefermengen gewährleisten, hierbei gibt es auch Ausnahmen. Der Axialverdichter, ist gut für große Liefermengen geeignet (vl. Handbuch Drucklufttechnik, 1977 S. 91 – 92). Das System der Anlage wird hierbei gekühlt, was sehr schwer ist aufgrund der Schaltung der Schaufeln. Axialverdichter, arbeiten mit ölfreier Luft und sind sehr empfindlich bei Belastungsänderungen. Die Schaufeln sind nicht einfach zu analysieren und zu dimensionieren dabei wird auch ein 100% Einspanngrad bei der Fertigung erwartet (Sprngler 1966, S. 611–612).



Abbildung 20: Sechsstufiger Axialverdichter
(Quelle: Böge und Böge 2016, S. 1127)

3.1.9. Radialverdichter

Der Radialverdichter ist ein Turbokompressor, bei dem das zu komprimierende Gas durch ein in einem angepassten Gehäuse laufendes Flügelrad in eine Rotation versetzt wird. Die Radialverdichter, arbeiten in radialer Richtung somit ist ein Kennzeichen, dass die Strömungsrichtung in radiale Richtung erfolgt. Die Luft bzw. Gase, werden in das Zentrum des rotierenden Laufrades weitergeleitet und mit Fliehkraft

geschleudert mit Hilfe des Laufrades. Zuallererst durchströmt die Luft bzw. Gase durch einen Diffusor und wird anschließend weiter zum Laufrad befördert. Hierbei wird die kinetische Energie in einen statischen Druck umgewandelt bzw. verändert. Das System, ist abhängig von der Dichte des Gases und des Stufendruckverhältnisses. Radialverdichter, eignen sich gut für eine Zwischenkühlung in fremden Systemen, dadurch wird ein besserer Wirkungsgrad erreicht. Radialverdichter, sind sehr empfindlich gegen Druckabfälle, daher sind die Kühler im Zyklus weit ausgelegt. Die Kühlung, wird ab vier bar eingestellt, in den anderen Kompressoranlagen. Die Radialverdichtern gehören sehr hoch mit den Betriebsdrehzahlen eingestellt. Sie erreichen bis zu 100.000 u/min in der Betriebszeit. Zu den Eigenschaften der Radialverdichtern gehören ölfreie Luft oder gase und eine, gleichmäßige Förderung des Systems. Negative Punkte sind die empfindlichen Belastungsänderungen im Betrieb und das Erfordernis von Mindestfördermengen. In Abbildung 21, ist der Aufbau eines Radialverdichters zu erkennen.

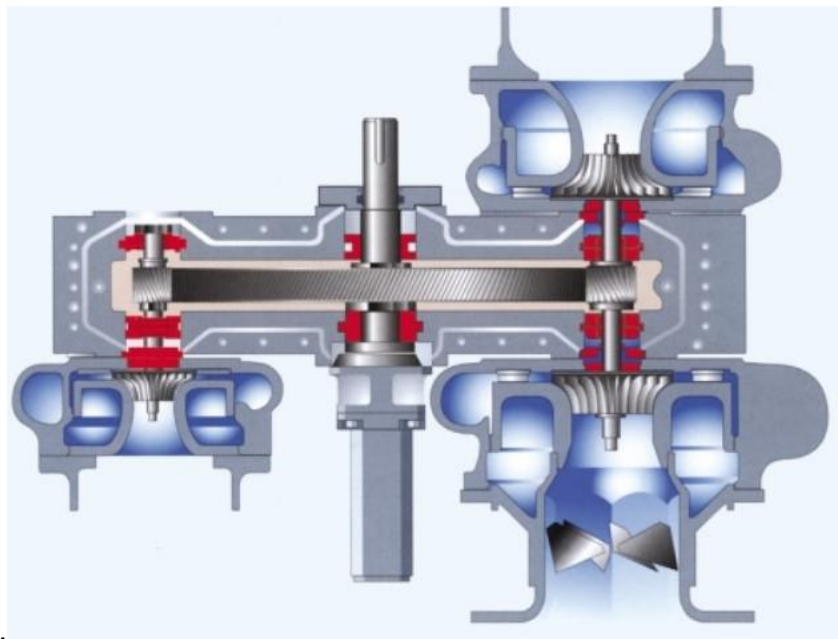


Abbildung 21: Radialverdichter
(Quelle: Böge und Böge 2016, S. 45)

3.2. Instandhaltungsstrategien

Eines der wichtigsten Grundlagen für einen erfolgreichen Betrieb der Anlagen, ist die Instandhaltung nach DIN 31051 „Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Zustandes von Anlagen“. Die DIN 31051 beschreibt die Beschaffenheit bzw. den Istzustand der Anlagen inklusive eines Abgleiches mit dem Sollzustand. Die Inspektion sowie die Instandhaltung der Anlage ist gleichzeitig eine Aussage der über wirtschaftlichen Aspekte der Firma. Durch die langen Betriebszeiten, sind die Anlagen in teilweise permanentem Betrieb, daher kann es schnell zum Verschleiß diverser Anbauteile kommen. Somit gehören die Instandhaltung sowie die Inspektion zu den wichtigsten Themen, um weitere ungewollte Kosten sowie Ausfälle zu vermeiden die zu erhöhten Kosten führen können. Natürlich wird die Höhe der Reparaturkosten auch bei der Frage in Betracht gezogen, ob diese die Wirtschaftlichkeit der Anlage in Frage stellt. Außerdem sorgt natürlich eine entsprechende Wartung der Anlagen für Betriebssicherheit. Eine Störung oder ein Defekt der Anlage könnte im schlimmsten Fall auch die Sicherheit am Arbeitsplatz gefährden. In der Abbildung 22 ist die Strategie der Instandhaltung abgebildet.

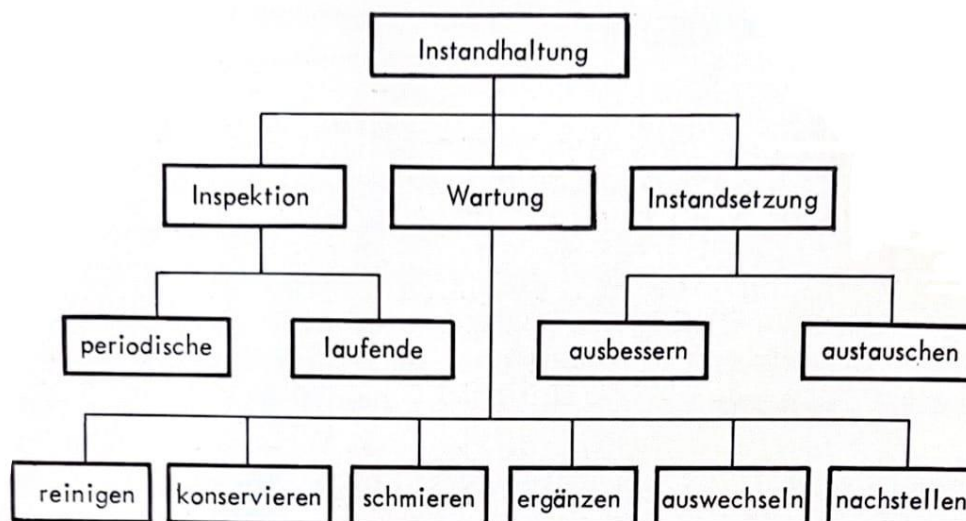


Abbildung 22: Instandhaltungsaufgaben

(Quelle: Mohrig 1988, S. 210)

Heutzutage werden die Instandsetzungsmaßnahmen sehr organisiert gesteuert und mit Planungen festgehalten. Durch die immer besser werdende Datenverarbeitung der EDV kann und wird das System beobachtet. Somit werden regelmäßige

Instandhaltungsarbeiten z. B. bei Austauschteilen wie Filter, Schmieröl frühzeitig durch eine Überwachung erkannt. Dadurch wird eine hohe Effektivität am Arbeitsvorgang gewährleistet, indem benötigte Anbauteile frühzeitig herangeschafft werden können. Jedes Bauteil, an der Anlage ist von Wichtigkeit, somit hat jedes Bauteil eine separate Überprüfung und eine Wartung. Schon bei kleinster Störung könnte die Anlage nicht die gewünschte Leistung erbringen, somit könnten Folgeschäden entstehen wodurch z. B. eine Produktionsanlage zum Stillstand kommen kann Mohrig 1988, S. 209–225 Rothe 1994, S. 17–22.

Die weiteren Instandhaltungen sind:

- a. Korrigierte Instandhaltung
- b. Präventive Instandhaltung
- c. Prospektive Instandhaltung

3.3. Industrie 4.0

Die Industrie 4.0 ist die sogenannte vierte „Industrielle Revolution“, welche den Industriestand bis zum heutigen Tag beschreibt und darüber hinaus bis in die Zukunft geplant ist. Die wichtigste Auswirkung, ist hierbei die fortschreitende Entwicklung der Technik, welche in vielerlei Hinsichten eingesetzt wird. Die „industrielle Revolution“, beschreibt außerdem die Produktionsmethoden, die sich komplett verändert haben, und es ist kein Ende abzusehen (vgl. Bauer et al. 2014, S.12).

Es gibt grundlegende Komponenten der Industrie 4.0 (siehe Abbildung 23).

- **Individualisierte Produkte**

Herstellung nach Kundenspezifikation, somit werden Lieferungen angefangen mit der Produktion bis zu den Lieferzeiten auf den Kunden abgestimmt, indem die Kundenwünsche organisiert erfüllt werden können.

- **Wertschöpfungsnetzwerke**

Hierbei werden die Kundenaufträge mit der Fertigstellung koordiniert und durch Informationsaustausch das Material sowie andere Dienstleistungen angepasst.

- **Smart Factory**

Smart Factory steht im Vordergrund der Industrie 4.0 und bezeichnet die Produktionsebene, welche sich selbst bereitstellt. Zu dieser Produktionsebene schließen sich die Fertigungsanlagen an, sodass gekoppelt wird, und zwar mit den

Logistiksystemen. Es ist Teil der Hightech-Strategie der Bundesregierung im Rahmen des Zukunftsprojekts Industrie 4.0.

- **Big Data**

Hierbei werden durch die Informationsverarbeitung die Programmierung sowie die Speicherung der Daten festgehalten. Durch die Sensorik, wird ein großer Umfang von Daten zur Weiterverarbeitung sowie zur Verbesserung genutzt. Dadurch können Simulationen durchgeführt werden, die den Ablauf der Fertigung vereinfachen können. Ein weiterer Bestandteil sind auch die Datenschutzverordnung und Datenverarbeitung.

- **Cyberphysischer Systeme**

Unter dem Begriff cyberphysische Systeme versteht man die fortgeschrittene Technik in der Sensorik und Aktorik in Echtzeit. Sie werden im Rahmen der Unterstützung von Produktionsprozessen eingesetzt. Dabei kommen z.B. KI-Roboter wie Elektrofahrssysteme zum Einsatz. Es besteht dadurch eine Vielzahl von Vereinfachungen der Arbeitsschritte und Abläufe die, Menschen ersetzt (Holtschulte 2021, S. 31–33).

Sensoren:

- CO2-Sensoren
- Temperatursensoren
- Schallsensoren
- Luftfeuchtigkeitssensoren

Aktoren:

- Relais
- Motoren
- Heizgeräte
- Piezoelektrische Wandler

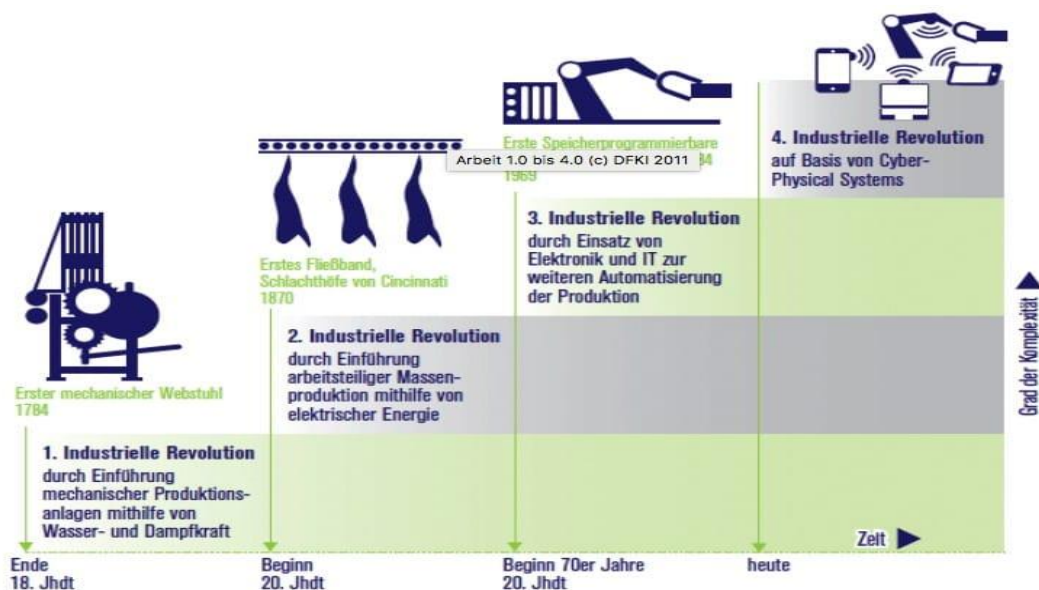


Abbildung 23: Industrielle Revolution

(Quelle: acatech 2013, S.17)

Es besteht somit ein breites Spektrum von der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine, daher müssen zuerst einmal die Ziele eines Unternehmens in der Verfahrens- und Fertigungstechnik näher verfolgt werden (Steven 2018, S. 15–22) .

4. Anwendungsmöglichkeiten der Kompressoren

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, gibt es ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten von Kompressionsanlagen. Durch die unterschiedlichen Betriebsmöglichkeiten und auch die unterschiedlichen Anwendungen haben sich die Anlagen sehr weit ausgelegt. Einige dieser Bereiche werden im Folgenden erwähnt und mit ihren Unterpunkten bzw. genaueren Zweigen anhand einer Tabelle erläutert.

Tabelle 1: Anwendungsmöglichkeiten der Kompressoren

Bergbau	Unter anderem Pendel und Sprengwagen, sowie Presslufthammer und pneumatische Meißel finden hier ihre Anwendung. Gesteinsbohrhämmer, Vorschubeinrichtungen, als auch Bewetterungsanlagen sind führende Branchen dieses Absatzes.
Produktion und Handwerksbetriebe	Nicht selten werden hier Bohrmaschinen, Schrauben und Winkelschleifer eingesetzt. Auch Klammergeräte, Nagler und gelegentlich auch Farbspritzpistolen der Autoindustrie gehören dieser Sparte an z. B Fahrzeugtechnik und Produktionsanlagen oder Bohrmaschinen und Schrauber.
Chemie Industrie	Rohstoff und Prozessanlagen werden auch mit Hilfe Kompressoren zugeschaltet und ist von größter Wichtigkeit geworden z. B Oxidationsvorgänge und Ferngesteuerte Schieber.
Energiewirtschaft und	Sehr oft werden auch hier Kompressoren für Reaktorbrennstäben oder Kühlwasserkreisläufen zum Einsatz gebracht.

Kunststoffindustrie	Genauso wie in der Fertigungsformen oder Granulatförderung in Transportröhren. Genauso wie auch Form und Klebevorrichtungen in der Industrie.
Gesundheitswesen	Hier werden die Antriebe bzw. Große Leistungen von Wichtigkeit z. B Antriebe für Zahnarztbohrer oder großflächig in der Medizintechnik.
Holzverarbeitung	Auch vielseitig Eingesetzt in der Holzindustrie z.B. Pressen oder Automatische Palettennagler und Bohrschubeinrichtungen.
Handwerksbetriebe und Textilindustrie	Umfangreich wird hier oft zum Einsatz gebracht wie z.B. Nagler, Farbenspitzpistolen oder Winkelschleifer. Weit ist auch die Anlage in der Systemkühlung für Nähnaedel oder Klemm und Fixiereinrichtungen an Nähmaschinen.
Umwelttechnik und Verkehrswesen	Druckluftbremsen von PKW`s und LKW`s werden durch Kompressoren geregelt und Konstant überwacht, wie auch in Kläranlagen und mammutpumpe für Unterwasserförderung.

5. Programmierung

In der Programmierung haben wir Steuerungs- und Überwachungssysteme. Die aufgezeichneten Daten werden eingelesen und gespeichert. Dies dient dazu, den Soll-Wert mit dem Ist-Wert vergleichen zu können. Tritt eine Änderung ein, wird dies vom Sensor bzw. Monitoring als Systemfehler gemeldet. Diese Änderungen können Druck, Temperatur und Widerstand sein. Mit Hilfe von Aktoren werden Daten erfasst, gespeichert und gesteuert. Die Planung von Verfahrensabläufen wird immer präziser und damit fehlerbegrenzend (Woyand 2021, Vorwort).

5.1. Programmiersprache Python

Die Programmiersprache Python wurde in den 1990er Jahren von Guido von Rossum vom Amsterdam Centre Wiskunde & Informatica (CWI) entwickelt. Heute ist Python eine der bekanntesten und am einfachsten zu erlernenden Programmiersprachen. Seine Hauptvorteile sind seine Benutzerfreundlichkeit und einfache Bauweise. Eine sehr umfangreiche und mächtige Standardbibliothek und große Flexibilität. Python ist in der Datenwissenschaft und im maschinellen Lernen weit verbreitet. Python ist dank einer großen Anzahl wissenschaftlicher Open-Source-Bibliotheken eine der an den weitesten verbreiteten Sprachen in der Forschung zu künstlicher Intelligenz. Python ist eine „interpretierte“ Programmiersprache, das heißt, nachdem die Datei „example.de“ ausgeführt wurde, übersetzt der Compiler sie in Bytecode. Im Gegensatz zu vielen anderen Programmiersprachen muss dieser Bytecode jedoch von einem Interpreter gelesen werden, um auf dem Prozessor ausgeführt zu werden. Dies hat den Vorteil, dass derselbe Python-Code unverändert auf jeder Plattform ausgeführt werden kann, auf der ein Python-Interpreter verfügbar ist. Aufgrund der Einführung von Interpretern laufen Programme in interpretierten Programmiersprachen jedoch langsamer als ihre Pendanten in nicht interpretierten Programmiersprachen. Python stellt eine eigene Entwicklungsumgebung IDLE (Integrated Development Environment) und einen interaktiven Modus zur Installation bereit (Woyand 2021).

5.2. Erweiterungspakete Visual-Python

Visual Python, kurz VPython, ist ein Erweiterungspaket für die Programmiersprache Python, das nicht Bestandteil der Standardbibliothek ist. Die erste Version wurde um die Jahrtausendwende veröffentlicht. VPython ist in Python und C++ geschrieben und ermöglicht Programmierern das Erstellen, Animieren und Öffnen von 3D-Objekten. Es bietet eine eigene Entwicklungsumgebung, VIDLE, die speziell für die Programmierung mit VPython erstellt wurde. Die Möglichkeit, 3D-Grafiken in Echtzeit animieren zu können, insbesondere für Studenten in Physikfächern, die kein tiefes Verständnis für den Prozess haben, wurde bei der Erstveröffentlichung positiv aufgenommen. VPython ist nicht mit der gleichnamigen Entwicklungsumgebung Visual Python zu verwechseln. (Woyand 2021).

5.3. CSV Comma-seperated Values

Eine CSV-Datei ist ein textbasiertes tabellarisches Dateiformat mit der Dateiendung „csv“. Dateien mit kommagetrennten Werten, wörtlich übersetzt als Dateien mit kommagetrennten Werten, werden verwendet, um tabellarisch strukturierte Daten zu speichern oder auszutauschen. Eine CSV-Datei, besteht aus einzelnen Reihen von Zellen (Werten), die durch ein Trennzeichen (normalerweise ein Komma) getrennt sind. Das Dateiformat ist nicht standardisiert, was zu Abweichungen führt. Dies wirft ein Problem auf: Unterschiedliche Systeme verwenden manchmal unterschiedliche Trennwerte. Andere Probleme können auftreten, weil der Wert der Zelle die gleichen Zeichen wie das verwendete Trennzeichen enthält. SolidMatrix Technologies Inc. bietet eine grundlegende Beschreibung des Dateiformats. CSV-Dateien werden von verschiedenen Systemen verwendet (Woyand 2021).

6. Vorausschauende Instandhaltung

Mit der Programmiersprache Python wurde ein Programm geschrieben um die Instandhaltung im System zu überwachen. Dabei wurden die Drücke, Temperaturen und Öle als Voraussetzung genommen. Die Instandhaltung, ist von größter Wichtigkeit, um, wie auch bereits erwähnt, keine Störungen im System und somit keine Ausfälle im System zu haben. Zu Beginn des Programmes wird die Bibliothek „csv“ eingebunden, mit der nachfolgend die zu Grunde liegende CSV-Datei eingelesen werden kann. Dies geschieht mit dem Befehl „import csv“. Solche Importe befinden sich zumeist in den obersten Zeilen und so ist es auch hier umgesetzt. Anschließend werden einige Kon-

```
51 len_data_set = 11971
52 min_RUL = 3. # [%]
53
54 # parameter pressure
55 pressure_column_index = 14
56 above_c_pressure_y = 44
57 n_times_above_pressure_c_total = 118
58 max_periods_above_c_pressure_y = 110
59 average_periods_above_pressure_y = len_data_set / float(n_times_above_pressure_c_total)
60
61 # parameter temperature
62 temperature_column_index = 15
63 above_c_temperature_y_total = 800 # 5
64 n_times_above_c_temperature_total = 207
65 max_periods_above_c_temp_y = 200
66 average_periods_above_temp_y = len_data_set / float(above_c_temperature_y_total)
```

Abbildung 24: Definierte Konstanten im Python-Skript

stanten, die innerhalb des Programmes genutzt werden, definiert. Dazu zählt die Anzahl der Einträge der CSV-Datei, die die Grundlage der gesamten Berechnung innerhalb des Skriptes darstellt. Diese CSV-Datei ist von <https://www.kaggle.com/nicolas-caparroz/turbofan-hpc-efficiency> entnommen und beinhaltet die für uns relevanten Informationen in Spalte 15 „LPTEExitPressureP5_kPA“ (Druck am Ausgang der Niederdruckturbine) und Spalte 16 „LPTEExitTemperatureT5_K“ (Temperatur am Ausgang der Niederdruckturbine). Diese Daten repräsentieren die Sensordaten, die in regelmäßigen Zeitintervallen vom Sensor übermittelt werden. Die dazugehörigen Indizes (14 bzw. 15) sind ebenfalls als Konstanten definiert. Zudem kommen noch weitere Konstanten bzw. Annahmen, wie z.B. die Anzahl der Einträge in der CSV-Datei in der Konstanten „len_data_set“, das Remaining Useful Life („min_RUL“ oder Restnutzungsdauer) in Prozent oder der Grenzwert für den Druck („above_c_pressure_y“) mit

44kPa, die sich allesamt in den Codezeilen 51 bis 66 befinden (siehe Abbildung 24) und in der nachfolgenden Tabelle aufgezählt sind.

Tabelle 2 – Variablen und Bedeutungen

Variable	Annahme	Bedeutung
len_data_set	11971	Anzahl der Datensätze aus der CSV-Datei
min_RUL	3	Mindestrestnutzungsdauer
pressure_column_index	14	Spaltenindex in CSV-Datei für den Druck
above_c_pressure_y	44	Grenzwert in kPa
n_times_above_pressure_c_total	118	Anzahl der Drücke im Datensatz über Grenzwert
max_periods_above_c_pressure_y	110	Maximale Perioden über Grenzdruck
average_periods_above_pressure_y	11971 / 118	Durchschnitt Abstand zwischen Grenzdrucküberschreitungen
temperature_column_index	15	Spaltenindex in CSV-Datei für die Temperatur
above_c_temperature_y_total	800	Grenzwert in Kelvin
n_times_above_c_temperature_total	207	Anzahl der Temperaturen im Datensatz über Grenzwert
max_periods_above_c_temp_y	200	Maximale Perioden über Grenztemperatur
average_periods_above_temp_y	11971 / 800	Durchschnitt Abstand zwischen Überschreitungen der Grenztemperatur

Anschließend wird die eben beschriebene CSV-Datei zeilen- und spaltenweise in die Variable „values“ eingelesen mit Hilfe der Bibliothek „csv“. Die Variable „values“ ist eine Liste, die wiederum weitere Listen beinhaltet. Jede Liste spiegelt hierbei eine Zeile

der CSV-Datei wider. Jeder Eintrag in dieser Liste ist wiederum ein Element bzw. eine Zelle aus der CSV-Datei. Somit enthält z.B. die Liste an Index 1 (beginnend bei 0) alle Informationen aus der zweiten Zeile der CSV-Datei, wobei die Werte voneinander getrennt und nach Möglichkeit bereits in eine Gleitkommazahl umgewandelt sind. Diese Umwandlung wird mit der „float()“-Funktion erreicht. Da diese Konvertierung nur bei Zahlen mit dem Punkt als Dezimaltrennzeichen (oder Ganzzahlen) funktioniert, ist

```

> result = {'list': 11972} [['NetThrust_kN', 'CoreNozzleGrossThrust_kN', 'BypassNozzleGrossThrust_kN', 'Sp.FuelCons.
> 00000 = {'list': 17} ['NetThrust_kN', 'CoreNozzleGrossThrust_kN', 'BypassNozzleGrossThrust_kN', 'Sp.FuelCons.
> 00001 = {'list': 17} [38.4672554079904, 11.2175786339927, 102.952769123032, 14.3495405672162, 120.587661197136,
  00 = {float} 38.4672554079904
  01 = {float} 11.2175786339927
  02 = {float} 102.952769123032
  03 = {float} 14.3495405672162
  04 = {float} 120.587661197136
  05 = {float} 445.559446174912
  06 = {float} 1.66640351302522
  07 = {float} 308.277090509924
  08 = {float} 2.34240362180565
  09 = {float} 0.99953394095676
  10 = {float} 1.10399259007634
  11 = {float} 14944.8354190479
  12 = {float} 3261.91603194424
  13 = {float} 0.551987441986426
  14 = {float} 40.1345698682024
  15 = {float} 722.00894871207
  16 = {float} 0.861717434393081
  __len__ = {int} 17
> 00002 = {'list': 17} [44.2178558510494, 13.5866090672143, 108.449503350549, 15.2719648762781, 134.847057464207,
  00 = {float} 44.2178558510494
  01 = {float} 13.5866090672143
  02 = {float} 108.449503350549
  03 = {float} 15.2719648762781
  04 = {float} 134.847057464207
  05 = {float} 512.66672277337
  
```

Abbildung 25: Ausschnitt aus der Datenstruktur der eingelesenen CSV-Datei

ein try-except eingebaut, dass das Abstürzen des Programmes verhindert. Sollte eine Konvertierung fehlschlagen, so wird der rohe String-Wert dieses Eintrages in die Liste übernommen. Dies tritt jedoch nur in der allerersten Zeile der CSV-Datei auf, da sich dort die Spaltenüberschriften befinden, die selbstverständlich nicht in eine Zahl umgewandelt werden können. In allen anderen Fällen kann es als eine Art Vorsichtsmaßnahme verstanden werden, um Programmabbrüche zu vermeiden. Einen Ausschnitt aus der hier verwendeten Datenstruktur kann man in Abbildung 25 erkennen. Dort ist ebenso in der ersten Liste zu erkennen, dass sich dort die Überschriften befinden, die nicht zu Zahlen konvertiert werden können. Da uns lediglich die Zahlen nur den Spalten 15 und 16 interessieren, wird der erste Eintrag der übergeordneten Liste mit einem Slicing entfernt. Anschließend werden zwei Listen für die Drücke bzw. Temperaturen („pressure_values“ und „temperature_values“), sowie zwei Zähler definiert, die zählen, wie

oft der Druck bzw. die Temperatur eine kritische Schwelle übertreten haben. Anschließend werden alle Drücke und Temperaturen, die sich aktuell weiterhin in der Variablen „values“ befinden, mit Hilfe einer Schleife iterativ durchlaufen. Darauf folgend werden mit diesen und den anfangs definierten Werten die Funktion „get_remaining_useful_life“ jeweils separat aufgerufen. Das bedeutet, dass diese Funktion einmal für den Druck mit den dazugehörigen Konstanten und einmal für die Temperatur und den dazugehörigen Konstanten aufgerufen wird. Die eben erwähnte Funktion beginnt in Zeile 21 des Codes und endet in Zeile 43 (siehe Abbildung 27). Diese Funktion erwartet genau 7 Argumente, um sie korrekt ausführen zu können. Einerseits den aktuellen Parametertypen (Druck oder Temperatur), den tatsächlichen Wert von Druck oder Temperatur, den dazugehörigen und beschriebenen Zähler, den Grenzwert für Druck/Temperatur, die durchschnittliche Anzahl an Perioden zwischen Grenzwerten, die Maximalanzahl, die vom Parameter den Grenzwert übertreten darf und die Mindestangabe für den RUL. Innerhalb der Funktion wird zunächst überprüft, ob der gegebene Wert oberhalb des Grenzwertes liegt. Wenn das der Fall ist, so wird der ent-

```
RUL_in_percent_approx = round(100 * (1 - (counter_above_border / float(max_times_above_border))), 2)
```

Abbildung 26: Bestimmung der relativen RUL

sprechende Zähler um eins erhöht. Anschließend wird näherungsweise die RUL in Perioden berechnet. Dies geschieht durch die Berechnung der Differenz der Maximalanzahl an zulässigen Grenzwertüberschreitungen und der aktuellen Grenzwertüberschreitungen multipliziert mit der durchschnittlichen Periodenanzahl zwischen Grenzüberschreitungen. Das Ergebnis wird danach noch abgerundet bzw. zu einer

```
21 def get_remaining_useful_life(kind_of_parameter,  
22                             this_parameter,  
23                             counter_above_border,  
24                             y_border,  
25                             average_periods_between_border,  
26                             max_times_above_border,  
27                             min_RUL):  
28     if this_parameter > y_border:  
29         counter_above_border = counter_above_border + 1  
30  
31     RUL_in_periods_approx = (max_times_above_border - counter_above_border) * average_periods_between_border  
32     RUL_in_periods_approx = int(RUL_in_periods_approx)  
33  
34     RUL_in_percent_approx = round(100 * (1 - (counter_above_border / float(max_times_above_border))), 2)  
35  
36     approx_periods_till_oil_change = (max_times_above_border - counter_above_border) * average_periods_between_border  
37  
38     oil_change_overdue = 'yes' if RUL_in_percent_approx < min_RUL else 'no'  
39  
40     return counter_above_border, [kind_of_parameter, # 00.  
41                                 int(RUL_in_periods_approx), # 01.  
42                                 RUL_in_percent_approx, # 02.  
43                                 oil_change_overdue] # 03.
```

Abbildung 27: Funktion "get_remaining_useful_life"

Ganzzahl umgewandelt (Vergleich Zeilen 31 und 32 im Code). Als letzter Schritt wird die Formel aus Abbildung 26 angewandt, um aus der absoluten RUL, die relative bzw. prozentuale RUL zu bestimmen (gerundet auf 2 Nachkommastellen). In der Variablen „oil_change_overdue“ wird nun mit einem „yes“ oder „no“ bestimmt, ob ein Ölwechsel überfällig ist oder nicht. Die Funktion hat nun 2 Rückgabewerte. Zum einen gibt die Funktion den jeweiligen Zähler zurück, sowie eine Liste mit teils konstanten und teils berechneten Werten. In der Rückgabeliste befindet sich zunächst der Parametertyp, der bereits an die Funktion übergeben wurde. Darauf folgen die geschätzte absolute RUL, die prozentuale RUL, sowie das „yes“ / „no“ Urteil, ob ein Ölwechsel überfällig ist. Nachdem diese Funktion nun ausgeführt wurde, wird innerhalb der anfangs beschriebenen iterativen Schleife der jeweilige Zähler (Rückgabewert der Funktion) neu gesetzt. Zudem wird die beschriebene Liste aus dem Rückgabewert der Funktion in die entsprechenden Listen („pressure_values“ und „temperature_values“) geschrieben. Somit entsteht beim iterativen Durchlaufen wieder eine Datenstruktur (Listen in Liste), wie sie bereits beim Einlesen der CSV-Datei entstanden ist. Als letzter Schritt werden diese beiden Listen nun mit Hilfe der csv-Bibliothek in zwei separate CSV-Dateien geschrieben. In beiden Dateien befinden sich nun zunächst der Parametertyp, die geschätzten absoluten RUL-Perioden, die prozentuale RUL sowie ein eindeutiges „yes“ oder „no“, ob ein Ölwechsel bereits überfällig ist. Da anfangs als Konstante eine „min_RUL“ von 3% vordefiniert wurde, kann man in den Ausgabedateien erkennen, dass es in Spalte C zu einem Wechsel von „no“ zu „yes“ in verschiedenen Perioden kommt. So kann man erkennen, dass es in Periode 11.328 (siehe Abbildung 28: Excel Daten für Druck und Temperatur) zum Status des überfälligen Ölwechsels anhand der Temperatur und des Druckes kommt. So kann man erkennen, dass es in Periode 11.328 (siehe Abbildung 28: Excel Daten für Druck und Temperatur) zum Status des überfälligen Ölwechsels anhand der Temperatur und des Druckes kommt.

	A	B	C	D
11320	LPTExitTemp	104	3.5	no
11321	LPTExitTemp	89	3	no
11322	LPTExitTemp	89	3	no
11323	LPTExitTemp	89	3	no
11324	LPTExitTemp	89	3	no
11325	LPTExitTemp	89	3	no
11326	LPTExitTemp	89	3	no
11327	LPTExitTemp	89	3	no
11328	LPTExitTemp	74	2.5	yes
11329	LPTExitTemp	74	2.5	yes
11330	LPTExitTemp	74	2.5	yes
11331	LPTExitTemp	74	2.5	yes
11332	LPTExitTemp	74	2.5	yes
status_from_temperature				
Bereit				
11323	Pressure [kP	405	3.64	no
11324	Pressure [kP	405	3.64	no
11325	Pressure [kP	405	3.64	no
11326	Pressure [kP	405	3.64	no
11327	Pressure [kP	405	3.64	no
11328	Pressure [kP	304	2.73	yes
11329	Pressure [kP	304	2.73	yes
11330	Pressure [kP	304	2.73	yes
11331	Pressure [kP	304	2.73	yes
11332	Pressure [kP	304	2.73	yes
11333	Pressure [kP	304	2.73	yes

Abbildung 28: Excel Daten für Druck und Temperatur
(Quelle: Eigene Darstellung)

6.1. Optimierung der Anlagen

Mit CATIA V5 wurde der Antrieb von einem Keilriemen durch eine Kette ersetzt (Abbildung 30). Die Idee dabei ist, die Langlebigkeit der Anlage zu optimieren, um Ausfälle zu vermeiden. Die Anlage, hat durch den Kettentrieb längere Betriebslaufzeiten, wodurch auch die Wartungsintervalle verlängert werden. Die Schmierung ist durch die Vorschaltung des Öls im System einfach zuschaltbar. Die Schmierung, ist für die Anlage von größter Notwendigkeit, damit die Anbauteile geschmiert und der Antrieb reibungsfrei arbeiten kann. Das Öl im System hat mehrere Funktionen bzw. Eigenschaften, welche wie folgt aufgezählt werden:

- Schmieren
- Kühlen
- Dämmen
- Reinigen

Des Weiteren wurde eine Schutzvorrichtung erstellt. Diese ist zum Verschließen des Kettentriebes gedacht. Siehe Abbildung 32.

Hier wird eine Kette abgebildet, welcher bei Catia konstruiert wurde.

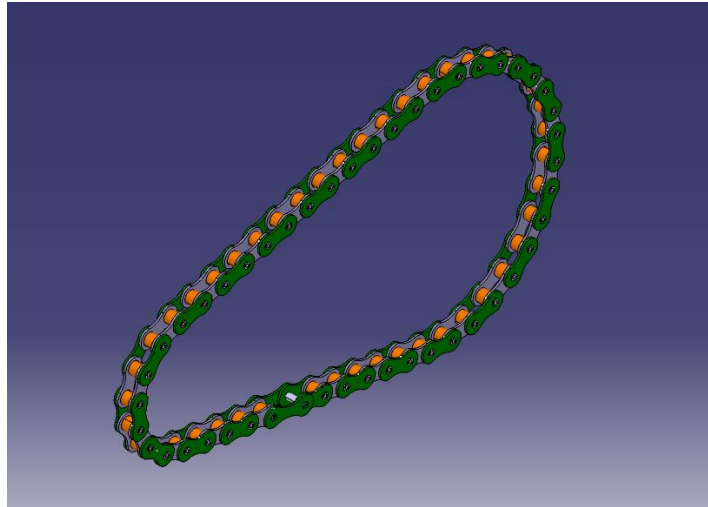


Abbildung 29: Kette
(Quelle: Eigene Darstellung)

In dieser Abbildung 31, wird die Kette mit den zugehörigen zahnrändern abgebildet.

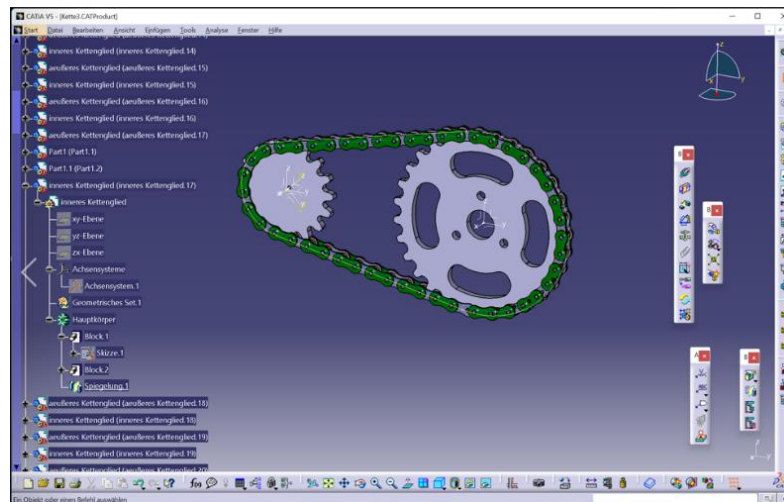


Abbildung 30: Kette mit Zahnrad
(Quelle: Eigene Darstellung)

Hier wird zu der Anlage noch das Gehäuse dargestellt. Sie dient als Schutz und Dämmung der Anlage (siehe Abbildung 32).

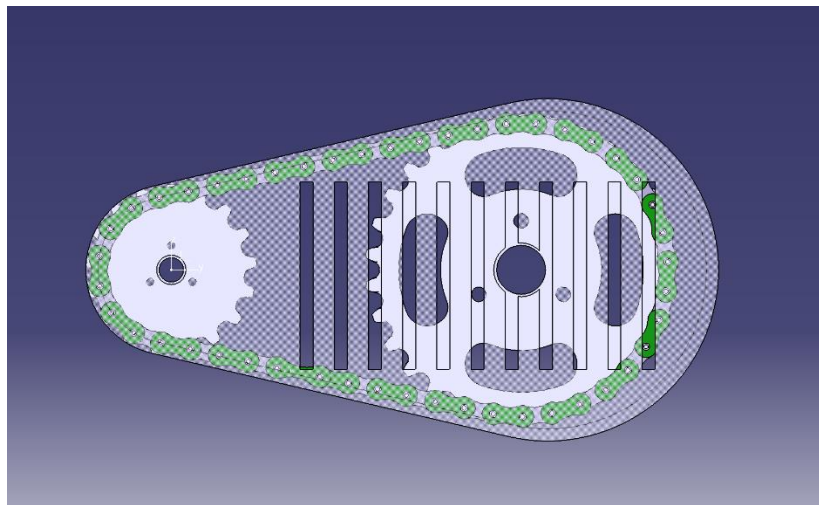


Abbildung 31: Zusammengebautes Modell mit Schutz
(Quelle: Eigene Darstellung)

6.2. Anschluss durch Alexa

Alexa, ist bekannt für die automatische Sprachsteuerung. Mit Hilfe von Alexa, könnte man auf das System zugreifen und die Überwachung sowie die Wartungsintervalle abfragen. Alexa, könnte das ganze System abspeichern und bei Fehlermeldungen automatische Warnsignale geben. Dieser Anschluss könnte sogar den Ablauf mit überwachen.

Vorteile:

- Automatisches Meldesystem
- Einfache Abfrage des Systems
- Einfache Bedienung
- Mehrere Steuereinheiten möglich.
- Kontinuierliche Abfrage Aggregate

7. Fazit

In der Bachelorarbeit wurden die verschiedenen Anlagen vorgestellt, sowie die Vorteile und Nachteile als auch die Anwendungsbereiche der Anlage beschrieben. Die Schwierigkeit lag darin, dass die Anlagen vom Technischen her zwar eine Verbesserung erfahren haben, allerdings wurden die Anlagen nicht in der Technik, sondern in der Steuerung sowie Regelung über die Zeit optimiert.

Durch die eigene Recherche wurde mit der Zeit festgestellt, dass die Technik immer noch gleichgeblieben ist, allerdings haben die Anlagen mit der Zeit immer weiter aufgrund der verbesserten Technik eine Optimierung erhalten. Diese Optimierung ist zu vergleichen mit der in der Kraftfahrzeugtechnik. Die Technik mit den 4 Zylinder Motoren als Beispiel ist gleichgeblieben, aber die Elektronik hat immer weiter zugenommen. Dadurch hat man das autonome Fahrverhalten im Gegensatz in den vergangenen 30 Jahren neu entwickelt. Genau diese Elektronik der Steuerung sowie auch der Regelung wurden bei den Anlagen mit der Zeit verbessert, so dass immer eine reibungslose Entwicklung gegenüber den Kunden sowie der allgemeinen Industrie gewährleistet werden konnte. Daher wurden in der Bachelor Thesis die modernste Technik mit der Programmiersprache Python verwendet. Mit der Programmiersprache Payton gab es am Anfang Schwierigkeiten durch die Umsetzung der Elektronik zur Technik, sie zu planen bzw. zu programmieren. Durch den einfachen Aufbau konnte eine Programmiersprache geschrieben werden, womit man zu einem Ergebnis gekommen ist. Unser Ergebnis hatte eine positive Auswirkung, indem man sich in dem Programm als Beispiel des Ölwechsels der Anlage als Ziel gesetzt hat. Das Resultat des Aufbaus ist, dass die Programmiersprache nach einer gewissen Lauf Leistung oder Betriebsstunden errechnen konnte wann das Öl im System gewechselt werden muss. Des Weiteren hat man sich hier bei der Programmiersprache Python auf die Temperaturen und Drücke im System konzentriert, welches die beiden Hauptbestandteile einer Anlage sind. In der Industrie ist es ein wichtiger Punkt, dass die Anlagen ohne Ausfälle mit wenig Aufwand im Betrieb sind und die Firma sie kostengünstig halten kann. Die Anlage wird durch die permanente Überwachung und Steuerung des einzelnen Systems oder dem Aufbau der Anlagen durch Sensorik und Aktorik gewartet.

Mit Hilfe dieser Angaben ist es möglich, Schwankungen im System bzw. der Anlagen zu erkennen und dementsprechend vorsorgliche Maßnahmen zu treffen. Diese können Ölwechsel, Aktorenwechsel oder Bauteile im System sein.

Anhand des Pythonprogramms ist das Ergebnis, dass zwei Tabellen erstellt wurden, indem man die Ergebnisse anhand der Drücke und Temperaturen erkennt. Die hat am Ende einen großen Umfang erreicht, allerdings musste man, um genauere Ergebnisse zu bekommen, die Arbeit weiter vertiefen, indem man sich speziell auf die Programm-sprache konzentriert.

Mit dieser Thesis ist ein Grundgerüst erarbeitet worden, mit dem man wissenschaftlich weiterforschen kann.

8. Literaturverzeichnis

Bahr, Michael; Ruppelt, Erwin (2000): Taschenbuch Drucklufttechnik. Essen: Vulkan-Verl. (DieBibliothek der Technik).

Bierbaum, Ulrich (2004): Druckluft-Kompendium. 6., überarb. Aufl. Darmstadt: Hoppenstedt Bonnier Zeitschriften.

Böge, Alfred; Böge, Wolfgang (Hg.) (2016): Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. Unter Mitarbeit von Klaus-Dieter Arndt, Werner Bahmann, Lutz Barfels, Jürgen Bauer, Herbert Bernstein, Gert Böge et al. Springer Fachmedien Wiesbaden. 23., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.

Böge, Alfred; Böge, Wolfgang (2021): Technische Mechanik. Statik - Reibung - Dynamik - Festigkeitslehre - Fluidmechanik. 34., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.

Copoco, Atlas (1975): Hanbuch Drucklufttechnik. Berlin: Wilhelm Möller OHG.

Faragallah, William Hakim (1989): Flüssigkeitsring-Vakuumpumpen und -Kompressoren. Essen: Vulkan-Verl.

Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Schnell, Walter; Schröder, Jörg (2004): Technische Mechanik. Band 3: Kinetik. 8., erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. Online verfügbar unter <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=170647>.

Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Schröder, Jörg; Wall, Wolfgang A. (2015): Kinetik. 13., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch, Bd. 3).

Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Schröder, Jörg; Wall, Wolfgang A. (2017): Elastostatik. 13., aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg (Lehrbuch, 2).

Holtschulte, Andreas (2021): Praxisleitfaden IoT und Industrie 4.0. Methoden, Tools und Use Cases für Logistik und Produktion. München: Hanser.

Konka, Karl-Heinz (1988): Schraubenkompressoren. Technik und Praxis. Düsseldorf: VDI-Verl.

Mohrig, Werner (1988): Druckluft-Praxis. Erzeugen - aufbereiten - verteilen - anwenden. Gräfelfing/München: Resch.

Rothe, Matthias (1994): Drucklufterzeugung und -aufbereitung. Methoden, Anwendung, Umweltschutz. 3. Aufl. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie (DieBibliothek der Technik, 76).

Segebrecht, Udo (1994): Flüssigkeitsringvakuumpumpen und Flüssigkeitsringkompressoren. Technik und Praxis. Renningen-Malmsheim: expert-Verl.

Sprngler, Hans (1966): Technisches Handbuch. Verdichter. Bearbeitete Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik.

Steven, Marion (2018): Industrie 4.0. Grundlagen - Teilbereiche - Perspektiven. Unter Mitarbeit von Marion Steven. Stuttgart: Kohlhammer Verlag. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:24-epflicht-1273753>.

Utri, Matthias (2021): Potenzial Von Nicht-Konstanter Rotorsteigung Für Schraubenkompressoren. Berlin: Logos Verlag Berlin (Schriftenreihe des Fachgebietes Fluidtechnik Ser, v.6). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6713022>.

VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (2010): Schraubenmaschinen 2010. Kompressoren, Lader, Motoren, Vakuum- und Flüssigkeitspumpen ; 8. VDI-Fachtagung, TU Dortmund, 5. und 6. Oktober 2010. Nichtred. Manuskriptdr. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2101).

Woyand, Hans-Bernhard (2021): Python für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Einführung in die Programmierung, mathematische Anwendungen und Visualisierungen. 4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446465015>.

M.I. Frenkel, Kolbenverdichter 1969

Dr. -Ing. Hans Bendler, Handbuch Drucklufttechnik

Bauer et al.2014.