

Die Erstellung eines rechnergestützten Anlagenoptimierungssystems unter Verwendung des von der Linde AG entwickelten Prozeßsimulators OPTISIM®; Erfahrungen an einer Luftzerlegungsanlage

J. Voit

Einführung und Zielsetzung

Bereits in den 70er Jahren wurde im Hause Linde damit begonnen, ein leistungsfähiges Simulations- und Optimierungssystem OPTISIM zu entwickeln. Seine Anwendung liegt in der Prozeß-Berechnung, Prozeß-Simulation und Prozeß-Optimierung. Die mit Hilfe von OPTISIM erstellten Rechenmodelle ermöglichen die wirtschaftlichste Lösung für Betrieb und Auslegung von Anlagen [1].

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der Betriebsoptimierung einer Linde-eigenen Luftzerlegungsanlage (siehe Bild 1) unter Verwendung von OPTISIM. Für den wirtschaftlichen Betrieb dieser Anlage sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Umgebungsbedingungen (Tag-Nacht, Sommer-Winter)
- Qualität der Einsatzluftmenge
- Produktspezifikation (Menge und Qualität)

- Produkt- und Energiekosten
- Verfügbarkeit von Anlagenteilen
- Betriebsgrenzen (Begrenzung der Leistungsaufnahme, Pump- und Drehzahlgrenzen der Maschinen, Staugrenzen von Kolonnen etc.)

Die Vielzahl der unterschiedlichen Randbedingungen und die Schwierigkeiten bei der Anpassung an den geforderten Betriebspunkt rechtfertigen den Einsatz des Betriebsoptimierungssystems OPTISIM.

An einem Beispiel wird gezeigt, welche Energieeinsparung durch OPTISIM an der betrachteten Linde-Anlage erzielt werden konnte.

Betriebsoptimierungssysteme für den stationären Anlagenbetrieb

In dem folgenden Flußbild ist die Vorgehensweise bei der Betriebsoptimierung aufgegliedert (Bild 2).

Ausgegangen wird von der Modellerstellung durch Prozeßabbildung mit Hilfe von OPTISIM. Bei OPTISIM handelt es sich um einen gleichungsorientierten Simulator. Der Aufbau des Flowsheets, das die Anlage als Modell widerspiegelt, bildet die Grundlage für ein in OPTISIM generiertes Gleichungssystem. Erleichtert wird die Modellerstellung durch eine umfangreiche Bibliothek für verfahrenstechnische Grundoperationen (Unit Operation) wie Maschinen, Wärmetauscher, Kolonnen, Regler etc.

Eine Schnittstelle zum Prozeßleitsystem sorgt für den Datentransfer zwischen Anlage und OPTISIM-Modell.

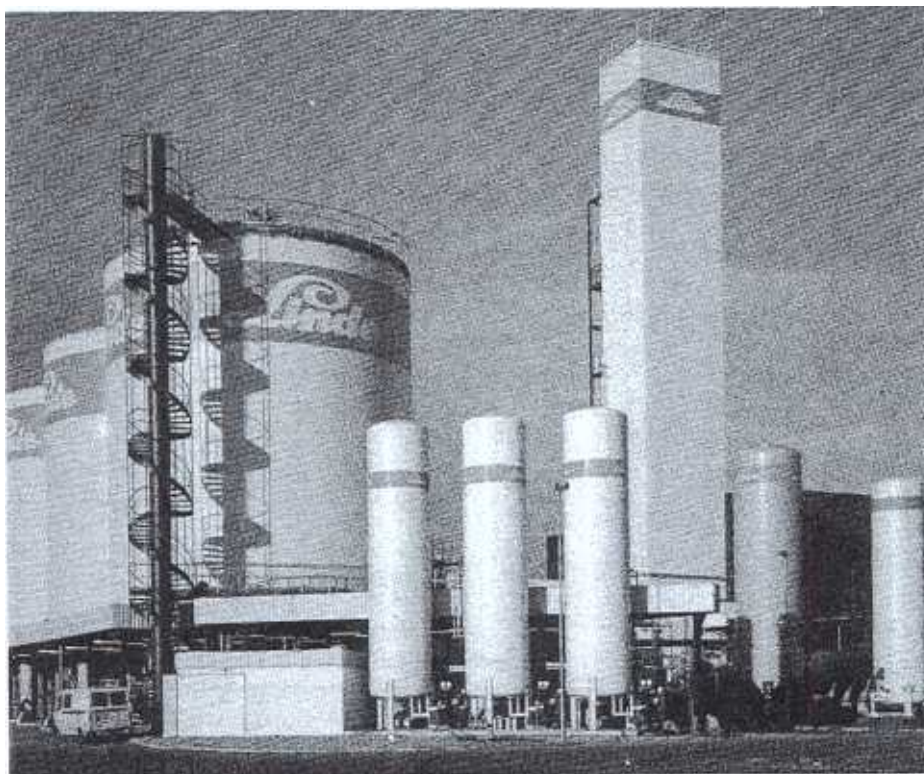


Bild 1 Kryogene Luftzerlegungsanlage

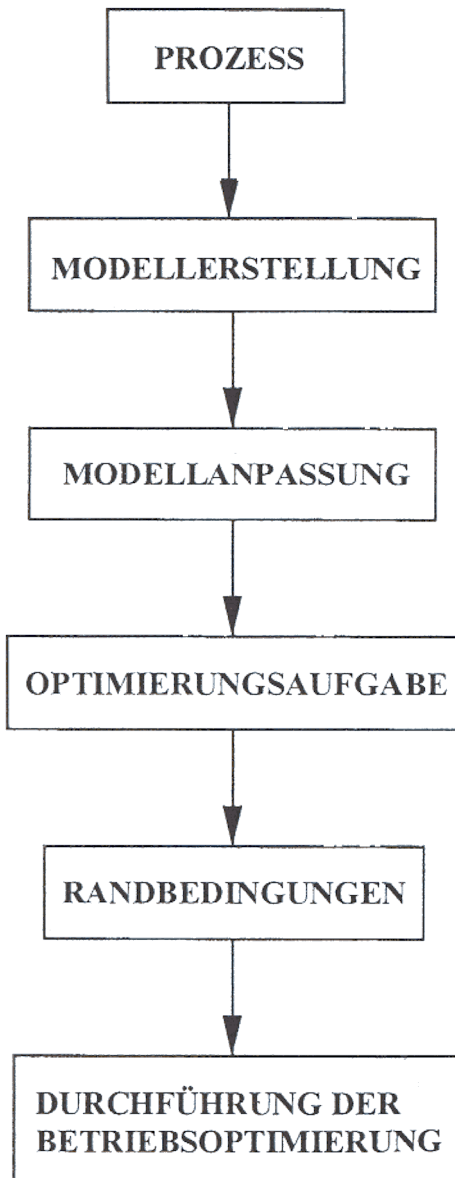


Bild 2 — Ablaufschema der Betriebsoptimierung

Im nächsten Schritt werden die Prozeßdaten (Meßwerte) in OPTISIM auf Plausibilität geprüft und automatisch vom Modell approximiert. Dadurch können Meßfehler und defekte Meßstellen erkannt und gegebenenfalls bei Überschreiten der Meßtoleranzen Korrekturen vorgenommen werden (Sensitivitätsanalyse). An der modellgestützten Prozeßdatenvalidierung nehmen nur Prozeßdaten teil, die die Vorselektierung zur Aussonderung der offensichtlich falschen oder verdächtigen Werte passiert haben. Ziel der Prozeßdatenvalidierung ist das Erkennen von verdächtigen Meßdaten sowie das Ermitteln von Korrekturfaktoren

für die betreffenden fehlerbehafteten Meßstellen (Data Reconciliation). Eine weitere Möglichkeit zur Modellanpassung bieten die Tuning-Parameter, die automatisch dem realen Prozeß angepaßt werden können. Tuning-Parameter beeinflussen z. B. Bodenwirkungsgrade von Kolonnen, Wärmeübergangskoeffizienten etc.

Bild 3 zeigt das Schema eines Gegenstromwärmeaustauschers mit einem Warm- und einem Kaltstrom. Heizflächen

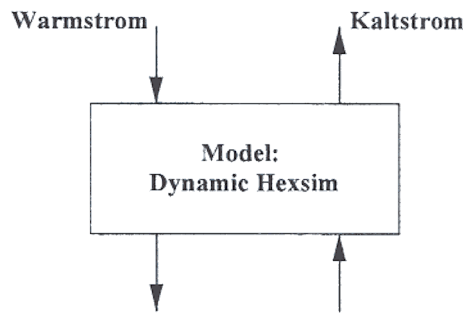


Bild 3 Schema eines Gegenstromwärmeaustauschers

und Wärmeübergangskoeffizienten wurden in die entsprechende Grundoperation (Dynamic Hexsim Unit) eingetragen. Es wurde eine Temperaturabweichung der Austrittsströme von jeweils 1 Grad gegenüber dem Modell simuliert. Die Tuning-Parameter verändern die Wärmeübergangskoeffizienten im Sinne der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Wenn die Summe

$$S = \sum_i [f(x_i) - \sigma(x_i)]^2$$

den kleinsten Wert hat, gilt die Funktion $\sigma(x_i)$ als beste Approximation von $f(x_i)$.

In Bild 4 ist der Iterationsverlauf der Tuning-Parameter aufgezeigt, bis die jeweilige Temperaturabweichung der Austrittsströme ihren kleinsten Wert angenommen hat. Die Tuning-Parameter und damit die Wärmeübergangskoeffizienten haben sich im Beispiel verdoppelt.

Nach diesen vorbereitenden Arbeiten können eine oder mehrere Optimierungsaufgaben formuliert werden. Typische Zielfunktionen sind z. B. Produktausbeuten und/oder Energieverbrauch etc. Durch Festlegung einer Zielfunktion werden die unabhängigen Variablen des Modells unter Einhaltung der eingangs erwähnten Randbedingungen solange iterativ verändert, bis das Extremum der Zielfunktion (Maximum oder Minimum) erreicht ist. Die Randbedingungen werden im Modell definiert, wobei die zugehörigen Min-Max-Grenzen bei Bedarf in entsprechenden Masken veränderbar sind. Während der Durchführung der Optimierungsaufgabe kann der Iterationsverlauf der interessierenden Parameter numerisch oder grafisch angezeigt und verfolgt werden. Jeder Änderungsvorschlag der unabhängigen Variablen in Richtung Extremum der Zielfunktion kommt aus dem OPTISIM-Modell und wird dort auf sein Konvergenzverhalten abgefragt. Bei zu hoher Änderungsgeschwindigkeit und damit Gefährdung der Konvergenzsicherheit wird die Gradientenbildung automatisch limitiert. Das Optimierungssystem kann mit oder ohne direkte

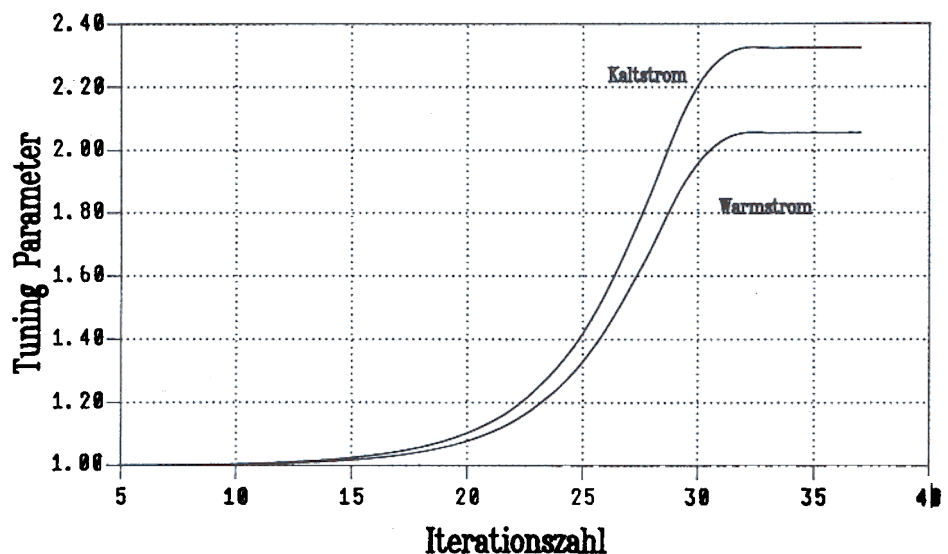


Bild 4 Iterationsverlauf der Tuning-Parameter

datentechnische Verbindung zum Prozeßleitsystem der Anlage betrieben werden (On-Line- bzw. Off-Line-Betrieb).

Als Anwendungsbeispiel dient im folgenden ein 4stufiger Stickstoffverdichter mit je einem Eintrittsleitapparat (ELA-Winkel α_{21} α_{24}) pro Stufe (siehe Bild 5). Für diesen Stickstoffverdichter mit drei Zwischenkühlern und einem Nachkühler wurde mit Hilfe von OPTISIM ein Simulationsprogramm auf der Basis des Originaldatensatzes der Einzelstufenkennlinien erstellt. Die Relation zwischen dem ELA-Winkel der 1. Stufe (α_{21}) als Führungsgröße und den ELA-Winkeln für die folgenden Stufen (α_{22} , α_{23} , α_{24}) wird an der Maschine über ein internes Verstellgesetz realisiert. Dieses Verstellgesetz gemäß Maschinenhersteller wurde durch ein Polynom approximiert und in das Simulationsprogramm eingetragen (siehe Bild 6). Die Winkelzuordnung ergab sich als annähernd linear. Die Optimierungsaufgabe für OPTISIM besteht in der Minimierung der Leistungsaufnahme der Maschine durch Auffindung der jeweils optimalen Winkelzuordnung im gesamten Lastbereich. Das heißt, die Zielfunktion ist in diesem Beispiel gleichbedeutend mit der Minimierung der Leistungsaufnahme der Maschine.

Die Randbedingungen wurden wie folgt definiert:

- Stickstoffliefermenge (60 % bis 120 %)
- Ansaugdruck (5 bar)
- Ansaugtemperatur (297 K)
- Austrittsdruck (20 bar und 28 bar)
- Rückkühltemperatur (298 K) für alle Stufen
- Einzelstufenkennfelder mit zugehörigen Pumpgrenzkennlinien.

Ergebnis: Gegenüber dem annähernd linearen Winkelverstellgesetz gemäß Maschinenhersteller lassen sich je nach Lastfall durch das Optimierungssystem OPTISIM zwischen 0,1 % und 5 % Energie einsparen (siehe Bild 7). Im Auslegungspunkt verschwindet die Energieeinsparung, da hier jeweils alle Leitapparate voll geöffnet sind. Die optimierten Winkelverstellgesetze (siehe Bild 8) weichen insbesondere im Unterlastbereich erheblich ab von der starren linearen Zuordnung gemäß Bild 6.

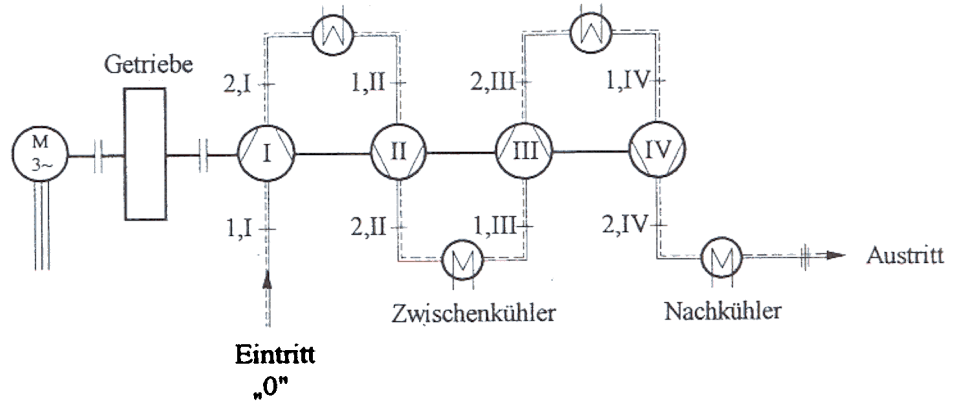


Bild 5 Schema eines vierstufigen Verdichters

Betriebsoptimierungssysteme für den instationären Anlagenbetrieb

Der automatische Lastwechsel im gesamten Lastbereich der Anlage erfolgt durch die Anwendung einer der Optimierungsroutinen in OPTISIM, wobei die durchzuführenden Änderungen der Anlagenlast oder der Produktverteilung in den Randbedingungen festgelegt werden. Die gewählte Zielfunktion führt den Apparat iterativ an den gewünschten Produktionspunkt. Dieser quasi stationäre Umstellvorgang läßt keine optimalen Umstellzeiten erwarten. Es ist bei dieser Methode aber sichergestellt, daß bei Abbruch des Umstellvor-

gangs alle von OPTISIM an das Prozeßleitsystem weitergegebenen Parameter-Sollwerte in sich konsistent sind. Die Umstellzeit richtet sich insbesondere nach dem Rechenzyklus, den Regelabweichungen und dem dynamischen Verhalten der Anlage.

Wenn sehr kurze Umstellzeiten gefordert sind, empfiehlt sich die Anwendung der dynamischen Simulation (sog. inverse Simulation). Hierbei werden die Stellgrößen dynamisch so berechnet, daß eine Prozeßgröße wie die Produktqualität zu jedem Zeitpunkt exakt spezifikationsgerecht bleibt. Man erhält auf diese Weise regelfehlerfreie, perfekte Stellgrößentrajektorien. Mit der dynamischen Simulation ist eine fundierte Aussage zur optimalen Fahrwei-

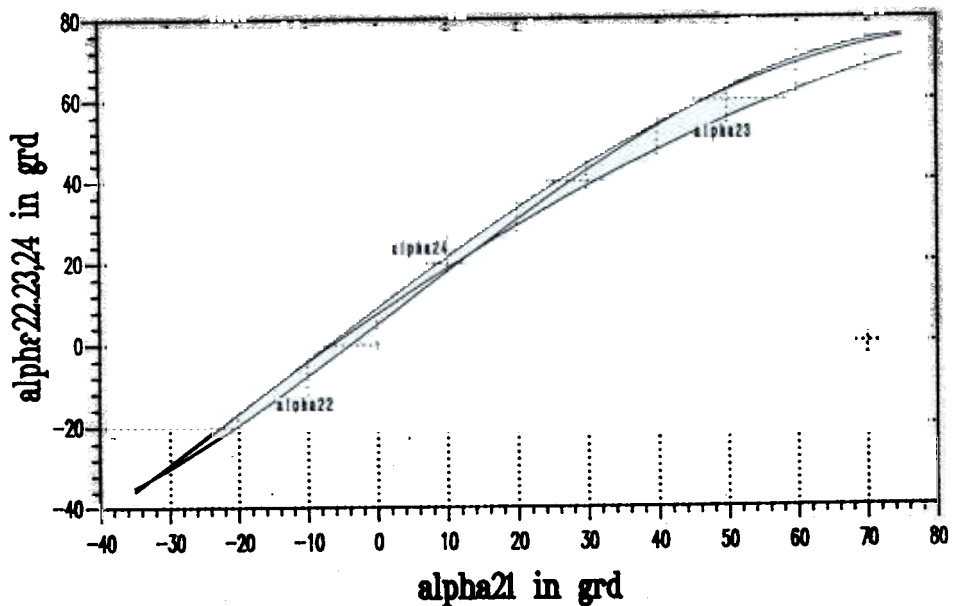


Bild 6 — Winkelverstellgesetze gemäß Hersteller

se bei der Lastverstellung und den Grenzen der dynamischen Vorgänge möglich [2].

Erfahrungen an einer Luftzerlegungsanlage

Bild 9 zeigt das Prozeß-Schema einer Luftzerlegungsanlage.

Der Apparat gliedert sich in drei Hauptabschnitte:

- 1) Luftreinigung, Verdichtung, Vorkühlung und Trocknung
- 2) Wärmeaustausch und Kälteleistung
- 3) Rektifikation.

Die Umgebungsluft setzt sich zusammen aus ca. 78 % N₂, 1 % Ar und 21 % O₂. Sie wird in Abschnitt 1 mehrstufig verdichtet (TC1), in einem Sprühzonenkühler (BC) gereinigt und vorgekühlt und anschließend durch eine Molesiebstation (MS1/2) von CO₂ und H₂O befreit. In Abschnitt 2 wird die trockene Luft auf -170 °C nahe dem Verflüssigungspunkt gekühlt, bevor sie in die Drucksäule (C1) und den eigentlichen Rektifikationsabschnitt gelangt. Hier wird die Luft aufgrund der unterschiedlichen Flüchtigkeiten von N₂, Ar und O₂ in ihre Produkte getrennt. Am Kopf der oberen Säule (Niederdrucksäule C₂) wird reiner Stickstoff (2 ppm Restverunreinigung) in flüssiger und gasförmiger Phase abgezogen. Im Sumpf der oberen Säule wird Sauerstoff (0,3 % Restverunreinigung) in flüssiger und gasförmiger Phase entnommen. Die flüssigen Produkte werden in Speichertanks abgefüllt. Der gasförmige Niederdruckstickstoff wird mit Hilfe eines Feedgasverdichters (TC5) dem Stickstoffkreislauf zugeführt. Die Kälteleistung für die vorwiegend flüssigen Produkte erzeugt ein Stickstoffkreislauf (Abschnitt 2) durch Kälteanlagen (FC1/2) und arbeitende Entspannungsturbinen (T1/2). Zwischen dem Sauerstoff- und Stickstoffabschnitt der oberen Säule wird argonreiches Gas zur Gewinnung von Argon herausgeführt und in einer separaten Kolonne (C₃) nachrektifiziert. Alle gasförmigen Produkte werden im Gegenstrom zur Luft und zum Kreislaufstickstoff angewärmt. Der abgebildete Prozeß wurde auf einer Workstation (Vax 3100) mit einem entsprechenden OPTISIM-Modell hinterlegt.

Als Beispiel für weitere Optimierungsaufgaben sollen zwei unterschiedliche Fahr-

weisen bei stationärem Unterlastbetrieb dienen, wobei als Zielfunktion jeweils die Gesamtenergie für den Prozeß gewählt wurde. Letztere setzt sich zusammen aus den Leistungsaufnahmen der Maschinen:

- Luftverdichter (TC1)
- Kreislaufverdichter (TC2)
- Feedgasverdichter (TC5)
- Kälteanlagen (FC1 und FC2).

Optimierungsaufgabe 1:

Alle Betriebsparameter wie Eintrittsleitapparate der Maschinen (insgesamt 11), Kolonnenrückläufe, Kreislaufdruckniveaus, Verteilung der Kreislaufmengen (Split Units) etc. sollen mit dem Ziel minimaler Gesamtenergie optimal eingestellt werden. Der Ansaugdruck des Kreislaufverdichters (TC2) soll mit Hilfe einer entsprechenden Klappenarmatur (V_{KL}) ebenfalls optimiert werden.

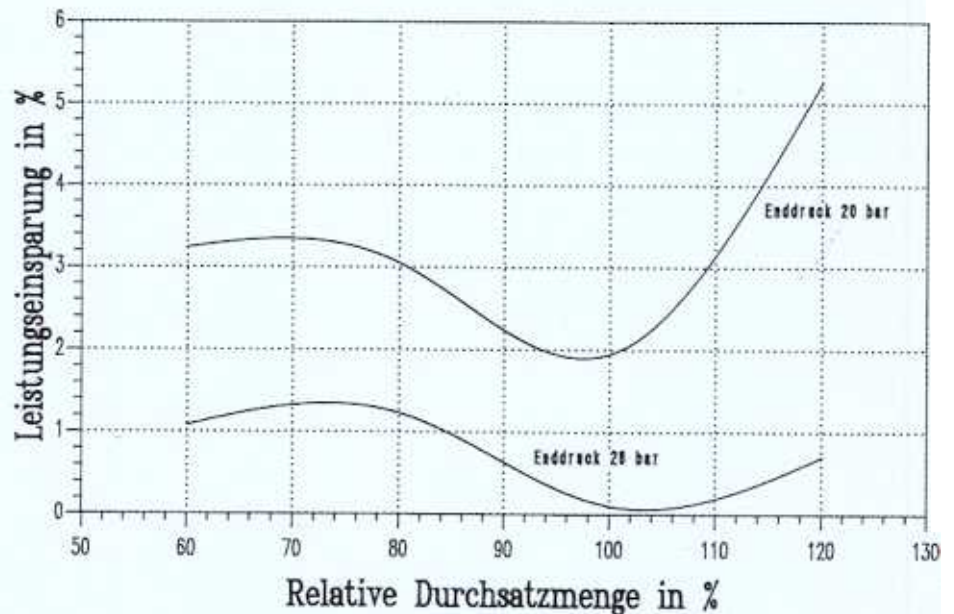


Bild 7 — Energie-Einsparung durch Optimierung der Winkelverstellgesetze eines vierstufigen Verdichters

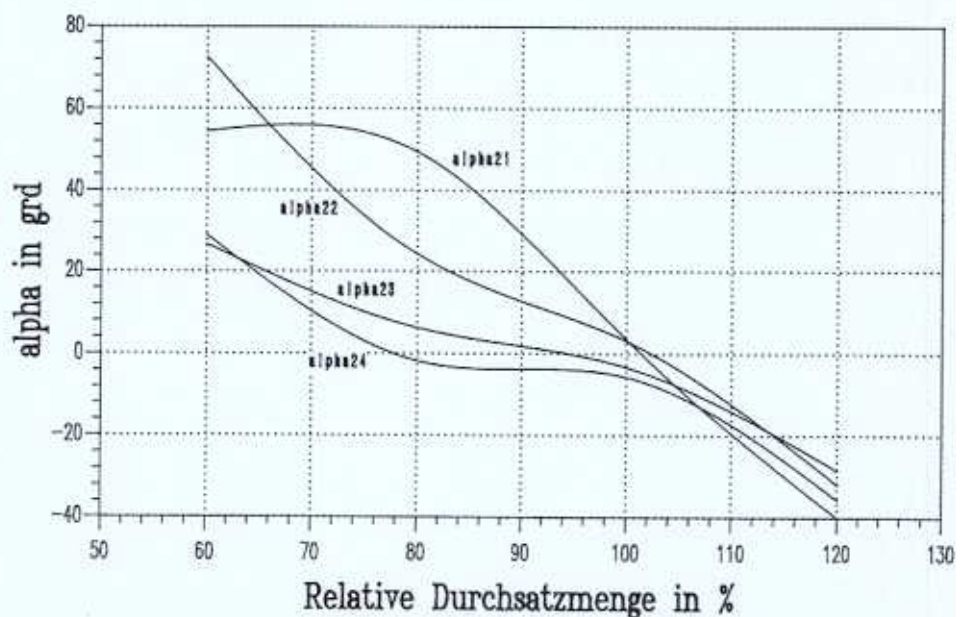


Bild 8 — Optimierte Winkelverstellgesetze, Verdichterenddruck 28 bar

Optimierungsaufgabe 2:

Die Eintrittsleitapparate der einzelnen Maschinen sind gemäß Hersteller starr gekoppelt.

Der Ansaugdruck des Kreislaufverdichters (TC2) wird nicht optimiert (Stellgröße $V_{KL} = 100\%$ geöffnet). Darüber hinaus besteht kein Unterschied zur Optimierungsaufgabe 1.

Beiden Aufgaben liegen folgende Randbedingungen zugrunde:

- Stationärer Unterlastbetrieb bei konstanten Umgebungsbedingungen und konstanter Produktspezifikation
- Maschinenkennfelder mit Pumpgrenzkennlinien und Drehzahlgrenzen gemäß Hersteller
- Feste Heizflächen der Wärmetauscher inkl. Wärmeübergangskoeffizienten gemäß Auslegung
- Feste Bodenverteilung der Kolonnen inkl. Bodenwirkungsgrade gemäß Auslegung

Ergebnis:

Die Saugdruckabsenkung am Kreislaufverdichter wird durch Androsseln einer gegenüber der Kreislaufmenge kleinen Drucksäulenstickstoffmenge realisiert. Im Unterlastbetrieb bewirkt dies ein entsprechend höheres effektives Ansaugvolumen, wodurch der Kreislaufverdichter in seinem optimalen Betriebspunkt gefahren werden kann. Die Eintrittsleitapparate der Einzelstufen werden vom Mitdrall in Richtung Nullgrad-Kennlinie geführt. Hierdurch verbessern sich die Wirkungsgrade der Einzelstufen deutlich (siehe Bild 10 am Beispiel der 4. Stufe), wodurch am Kreislaufverdichter ca. 2,5% Energie eingespart werden. Das Druckverhältnis am Feedgasverdichter wird deutlich kleiner, so daß an diesem Verdichter ca. 9 % Energie eingespart werden. Beide Expansionsturbinen entspannen auf einen niedrigeren Austrittsdruck.

Der Vergleich der beiden Fahrweisen bei Unterlast „mit und ohne Saugdruckabsenkung am Kreislaufverdichter“ ist in der

nachfolgenden Tabelle im Detail wiedergegeben. Hiernach erweist sich die Fahrweise „mit Saugdruckabsenkung am Kreislaufverdichter“ energetisch ca. 2,6 % günstiger.

Bei der betrachteten Luftzerlegungsanlage wurden die Leitapparate am Kreislaufverdichter für den Überlastbetrieb (0 bis -40 Grad Gegendrall) konzipiert. Im Unterlastbetrieb (0 bis 80 Grad Mitdrall) verlieren sie ihren Sinn, wie im Beispiel nachgewiesen.

Literatur

[1] P. S. Burr: The design of optimal air separation and liquefaction processes with the OPTISIM equation-oriented simulator, and its application to on-line and off-line plant optimization. Vortrag „AIChE Spring National Meeting, Houston, Texas, April 7-11, 1991“

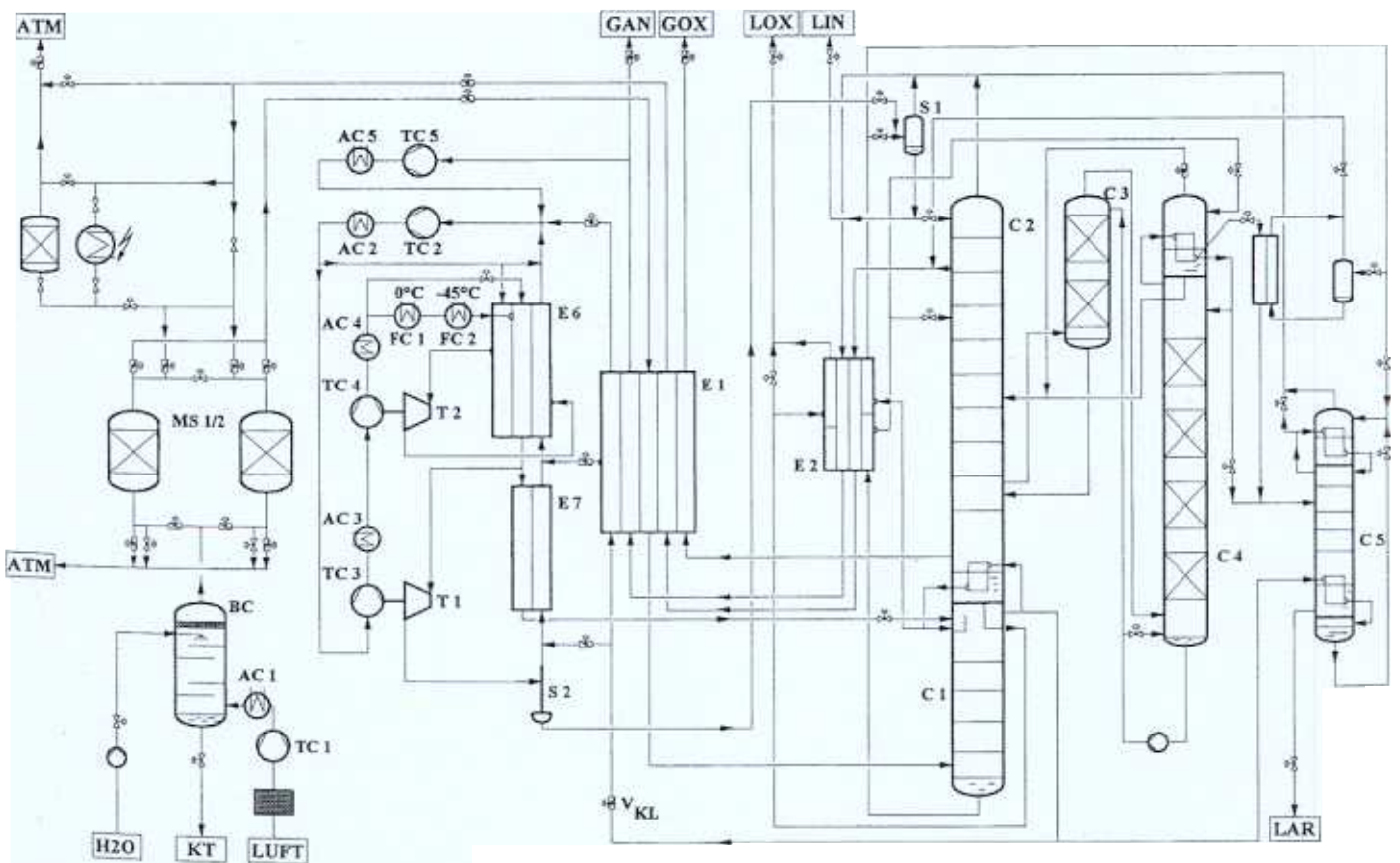


Bild 9 — Schema einer Luftzerlegungsanlage

[2] G. Zapp und W. Sandler (1993): Nichtlineare Steuerung und Regelung durch inverse Simulation mit komplexen DAE-Modellen, Chem.-Ing.-Tech. 65, Nr. 9.

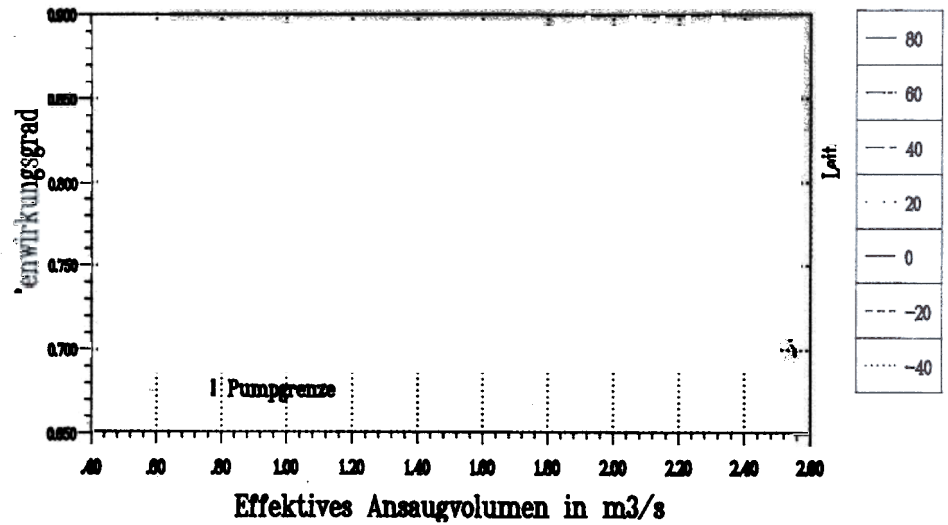


Bild 10 — Vergleich der Betriebskennlinien bei gedrosselter (x) und offener (o) Ansaugklappe des Kreislaufverdichters im Unterlastbetrieb

Tabelle	Dim.	Fahrweise mit Saugdruckabsenkung	Fahrweise ohne Saugdruckabsenkung
GOX	Nm ³ /h	1922	1922
GAR	Nm ³ /h	165	165
LOX	Nm ³ /h	2420	2420
LIN	Nm ³ /h	9683	9683
HLIN	Nm ³ /h	2420	2420
LUFT	Nm ³ /h	21220	21220
Kreislaufmenge	Nm ³ /h	84000	88356
Feedgasmenge	Nm ³ /h	11460	11780
Gesamtleistung	kW	8382	8602
Leistung TC1	kW	1534	1534
Leistung TC2	kW	5700	5850
Leistung TC5	kW	722	787
Leistung FC	kW	426	431
Enddruck TC2	bar	25,5	28,4
Enddruck TC3	bar	35,4	38,7
Enddruck TC4	bar	50,7	53,0
Enddruck TC5	bar	4,5	5,8
Druckdiff.			
Saugklappe D _p V ₁₁	bar	1,3	0,0
ALPHA 21	grd.	+ 2,1	+ 43,2
ALPHA 22	grd.	+ 7,6	+ 56,7
ALPHA 23	grd.	- 8,5	+ 50,2
ALPHA 24	grd.	+ 0,0	+ 56,8
ALPHA 51	grd.	+ 58,8	+ 41,2
ALPHA 52	grd.	+ 41,9	+ 52,7
ALPHA 53	grd.	+ 42,8	+ 41,4

Tabelle 1: Vergleich der Fahrweisen bei gedrosselter und offener Ansaugklappe des Kreislaufverdichters im Unterlastbetrieb