**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
**Band:** 78 (1960)
**Heft:** 34

**Artikel:** Eine Tieftemperaturanlage zur Gewinnung von schwerem Wasser
**Autor:** Hänny, Jost
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-64940

**Nutzungsbedingungen**
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 26.12.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P.

# Eine Tieftemperaturanlage zur Gewinnung von schwerem Wasser

Von Dr. **Jost Hänny**, Winterthur

DK 66.02:546.212.02

Die folgenden Ausführungen beschreiben eine Anlage zur Gewinnung von schwerem Wasser, welche in den «Emser Werken AG» in Domat/Ems steht und von Gebrüder Sulzer erstellt wurde. Als Ausgangsprodukt dient natürliches Wasser, das sich in drei Elektrolyseurstufen siebenfach an Deuterium anreichert. Das bei der elektrolytischen Zerlegung entstehende gasförmige Wasserstoff-Deuterium-Gemisch wird auf — 250 ° C abgekühlt und verflüssigt. Anschliessend gelangt die Flüssigkeit in eine Kuhn-Rektifizierkolonne, wo der Austauschvorgang bei 23 ° K eine 400fache Deuteriumanreicherung bewirkt. Das gewonnene Produkt wird mit Sauerstoff verbrannt und in einer zweiten Kuhn-Kolonne zu 99,8prozentigem $D_2O$ aufkonzentriert. Die Anlage in Ems arbeitet mit ölfreien Labyrinth-Kolben-Kompressoren und hochtourigen Expansionsturbinen für Wasserstoff. Es ist die einzige heute bekannte Anlage zur Verflüssigung von Wasserstoff, welche nur Expansionsturbinen und keine Stickstoffvorkühlung benötigt. Zur Isolation aller Wärmeaustauscher, Turbinen und Regelorgane wird Hochvakuum verwendet.

## 1. Zur Bedeutung des schweren Wassers in der Reaktortechnik

Das schwere Wasser ist das Oxyd des Deuteriums, eines Wasserstoffisotopes, dessen Kern neben dem Proton noch ein Neutron enthält, so dass sein Atomgewicht nicht 1, wie beim gewöhnlichen Wasserstoff, sondern 2 ist. Das mit dem Deuterium gebildete schwere Wasser wiegt etwa 10 % mehr als gewöhnliches Wasser. Sowohl seinem äusseren Aussehen als auch seinem chemischen Verhalten nach ist schweres Wasser kaum von gewöhnlichem Wasser zu unterscheiden. Es eignet sich aber vorzüglich als Moderator für Atomreaktoren.

Die Aufgabe der Moderatoren besteht bekanntlich darin, die bei der Spaltung eines Kerns von Uran 235 entstehenden schnellen Neutronen durch elastische Stösse abzubremsen, damit sie nachher leichter von andern Urankernen eingefangen werden können und sich so eine Kettenreaktion bildet. Es ist wichtig, dass der Moderator die Neutronen nur abbremst und möglichst wenige von ihnen selbst einfängt. Das schwere Wasser verschluckt bei diesem Bremsprozess 500 mal weniger Neutronen als das gewöhnliche Wasser, und die kritische Menge natürlichen Urans, d. h. die Menge, bei der die Kettenreaktion erst einsetzt, ist bei schwerem Wasser nur 5 t, während sie bei alleiniger Verwendung von Graphit als Moderator etwa 50 t beträgt.

Bei der Verwendung von Brennstoffelementen, in welchen das spaltbare Uranisotop 235 angereichert ist, eignet sich gewöhnliches Wasser als Moderator. Aber auch bei diesen Reaktoren ist die Verwendung von schwerem Wasser angezeigt, da es immer eine Einsparung an Neutronen bewirkt und es ja schliesslich die Neutronen sind, welche die Kettenreaktion auslösen. Ein Neutronengewinn bedeutet deshalb auch eine bessere Ausnützung des zur Verfügung stehenden Brennstoffes.

Tabelle 1 Physikalische Eigenschaften von schwerem und natürlichem Wasser

| Chemische Formel | | $D_2O$ | $H_2O$ |
|---|---|---|---|
| Molekulargewicht | | 20,03 | 18,016 |
| spez. Gewicht | kg/dm³ | 1,107 | 1,000 |
| Siedepunkt | °C | 101,4 | 100 |
| Gefrierpunkt | °C | +3,81 | 0 |
| Temp. der grössten Dichte | °C | 11,2 | 3,98 |
| kritische Temperatur | °C | 371,5 | 374,2 |
| Verdampfungswärme | kcal/kg | 495,2 | 533,3 |

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Eigenschaften von schwerem und natürlichem Wasser zusammengestellt.

## 2. Prinzip der Schwerwassergewinnung

Leider ist die Herstellung von schwerem Wasser mit einigen Schwierigkeiten verbunden, kommt es doch im gewöhnlichen Wasser nur im Verhältnis 1:7000 vor. Es braucht sehr gute Trennverfahren, um, von dieser geringen Konzentration ausgehend, das Endprodukt zu gewinnen, welches eine Reinheit von 99,8 % haben muss, damit es sich für Kernreaktoren eignet.

Alle praktisch verwendeten Herstellungsverfahren benützen zur Trennung einen Stoffaustausch. Dabei ist es vorerst gleichgültig, ob schweres Wasser oder eine andere Deuteriumverbindung angereichert wird. Bringt man in einer Kugel (Bild 1) zwei Phasen, z. B. eine Flüssigkeit und ein Gas miteinander in innige Berührung, etwa durch kräftiges Schütteln, und besteht jede Phase aus dem Gemisch einer Wasserstoff- und der gleichen Deuteriumverbindung, dann findet ein Austausch der Deuteriumatome statt. Sobald sich das Gleichgewicht eingestellt hat, wird in der Flüssigkeit eine grössere Menge Deuterium vorhanden sein als im Gas. Das kommt z. B. bei flüssigem Wasserstoff und Deuterium daher, dass der Wasserstoff leichter verdampft als das Deuterium. Infolge seines grösseren Dampfdruckes sendet er mehr Moleküle in den Gasraum aus.

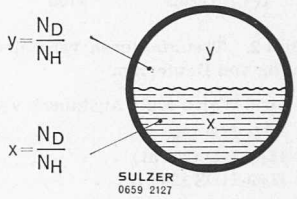



Bild 1. Trennfaktor des Deuteriumaustausches

Die beiden Phasen müssen aber nicht unbedingt Dampf und Flüssigkeit des selben Stoffgemisches sein; es gibt vielmehr auch noch andere Stoffpaare, welche sich für den Deuteriumaustausch eignen, wie z. B. — um die technisch wichtigsten zu erwähnen — Wasser und Wasserstoff, Wasser und Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Wasserstoff. In den meisten dieser Fälle findet allerdings der Austausch nur bei Anwesenheit eines Katalyten statt.

Bezeichnet man das Verhältnis zwischen Deuterium- und Wasserstoffatomen in der Flüssigkeit mit $x$ und im Gas mit $y$, dann wird der Stoffaustausch durch die Verhältniszahl $\alpha = x/y$ charakterisiert. $\alpha$ nennt man den Einzeltrennfaktor; er gibt sozusagen an, wie stark das Deuterium durch einmaliges Schütteln in einer Kugel angereichert werden kann.

In Bild 2 ist der Trennfaktor für verschiedene Austauschverfahren in Abhängigkeit der Temperatur aufgetragen. Es fällt auf, wie stark sich $\alpha$ bei den verschiedenen Stoffpaaren unterscheidet. Ferner ist auch seine grosse Temperaturabhängigkeit bemerkenswert. Während bei der Elektrolyse Trenneffekte von über 10 erreicht werden können, beträgt der Trennfaktor bei der einfachen Wasserrektifikation nur 1,05.

Beim ersten Betrachten dieses Diagramms würde man natürlich das Verfahren mit dem höchsten Trennfaktor auswählen. Leider wird die Wirtschaftlichkeit noch durch eine ganze Anzahl weiterer Faktoren bestimmt. So ist z. B. bei der rein elektrolytischen Herstellung der Energiebedarf für

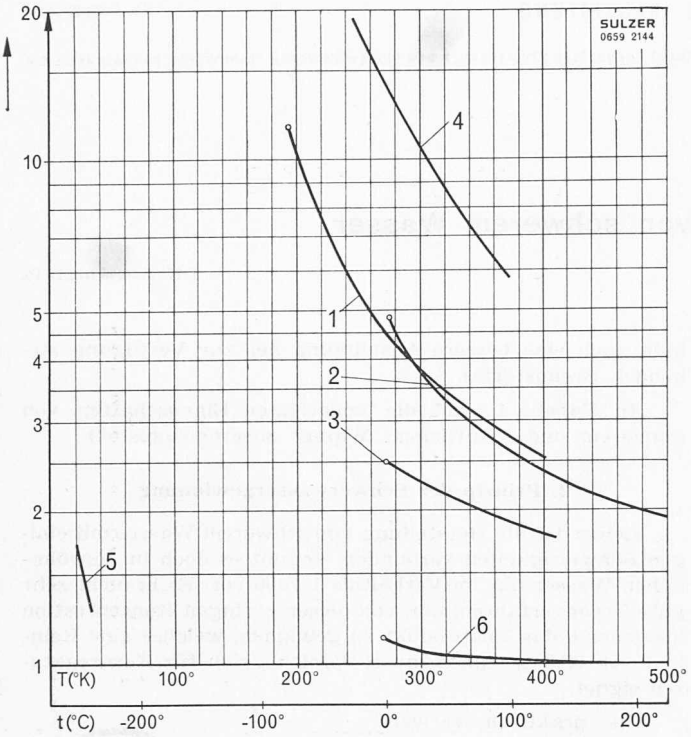
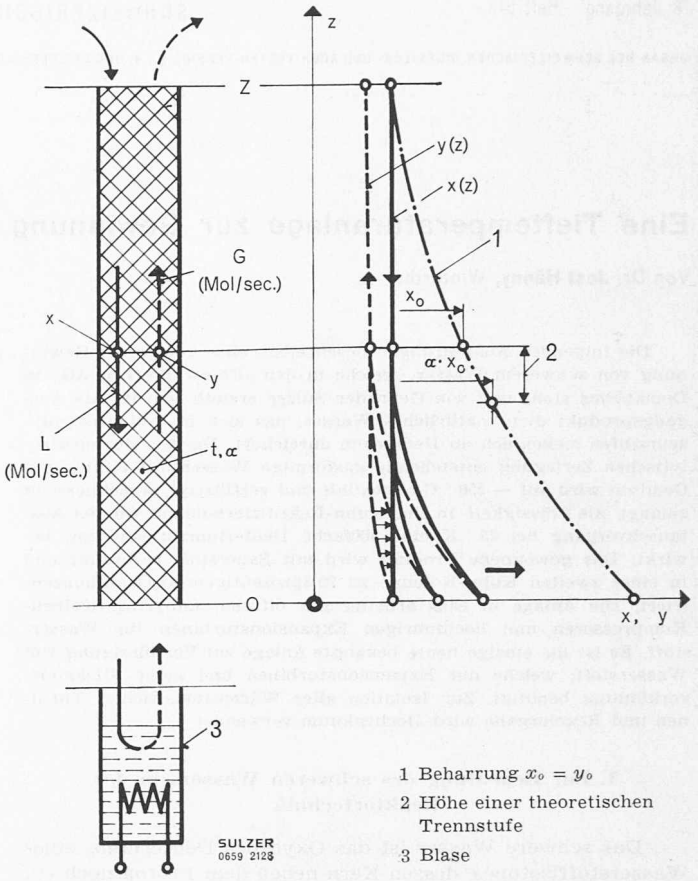



Bild 2. Trennfaktoren verschiedener Austauschverfahren zur Gewinnung von Deuterium

1 bis 3 Warm-Kalt-Austausch von:

1 $NH_3$-HD (500 at)
2 $H_2O$-HD (200 at)
3 $H_2O$-HDS (20 at)
4 Elektrolyse
5 Rektifikation $H_2$-HD (1,5 at)
6 Rektifikation $H_2O$-$D_2O$




1 Beharrung $x_o = y_o$
2 Höhe einer theoretischen Trennstufe
3 Blase

Bild 3. Wirkungsweise einer Austauschkolonne

die Zerlegung des Wassers verhältnismässig gross. Prof. *Clusius* hat schon im Jahre 1949 für dieses Verfahren einen spezifischen Energiebedarf von 120 bis 150 kWh/g $D_2O$ angegeben, während die Anlage in Ems, von der hier berichtet wird, nur etwa 2 bis 3 kWh/g $D_2O$ verbraucht.

Andere Verfahren müssen entweder bei sehr hohen Drükken oder sehr tiefen Temperaturen durchgeführt werden, oder es sind äusserst giftige, korrosive oder explosive Gase zu verarbeiten, alles Gesichtspunkte, welche die technische Verwirklichung wesentlich erschweren. Optimale Verhältnisse werden durch die Kombination verschiedener Verfahren erreicht. Sie hängen auch davon ab, ob eine Schwerwassergewinnungsanlage mit irgendwelchen anderen Fabrikationsbetrieben, die z. B. Wasserstoff benötigen, kombiniert werden kann. So werden beispielsweise in Ems gleichzeitig drei Verfahren angewendet: Die Elektrolyse, die Rektifikation von Wasserstoff und Deuterium und diejenige von Wasser und Schwerwasser.

Die Gewinnung von schwerem Wasser von 99,8 %, ausgehend von der natürlichen Anfangskonzentration von $^1/_{7000}$, entspricht einem Gesamttrennfaktor von 3 500 000. Die bei einmaligem Austausch erreichten Werte von 1,05 bis 10 sehen neben dieser Zahl kläglich aus. Um das gesteckte Ziel zu erreichen, muss der Einzeleffekt vervielfacht werden. Dieses geschieht in Austauschkolonnen oder Rektifiziersäulen. In einer solchen Kolonne, welche mit Füllkörpern gefüllt ist, wird die flüssige Phase oben aufgegeben (Bild 3). Im Gegenstrom dazu soll eine gleich grosse Zahl Wasserstoffatome in der gasförmigen Phase von unten nach oben steigen. Durch die grossen Austauschoberflächen der Füllkörper kann sich an jedem Ort der Kolonne das Gleichgewicht einstellen, welches durch den Trennfaktor definiert wurde, d. h. in einem beliebigen Schnitt beträgt die Deuteriumkonzentration im Gasstrom $y$ und in der Flüssigkeit $x$, wobei $x$ um den Trennfaktor grösser ist als $y$. Der Flüssigkeitsstrom enthält also mehr Deuteriumatome als der Gasstrom, und es findet ein Deuteriumtransport nach unten statt. Ob eine Anreicherung zustande kommt oder nicht, hängt lediglich noch davon ab, was man am unteren Ende der Säule mit diesen beiden Strömen macht. Bei der Rektifikation wird ganz einfach die Flüssigkeit, die herabrieselt, in einem Behälter, der sogenannten Blase, wieder verdampft. Es wird also vorerst überhaupt nichts entnommen. Wenn aber das Deuterium durch den Sauerstoffaustausch nach unten transportiert wird und unten nichts entnommen wird, dann muss es sich am unteren Ende der Säule anreichern.

Auf der rechten Seite von Bild 3 ist der Konzentrationsverlauf über der Kolonnenhöhe aufgetragen. Es ist hier angedeutet, wie die Konzentration vom unteren Ende her allmählich zu steigen beginnt, bis der strichpunktiert eingezeichnete Gleichgewichtszustand erreicht ist. Jetzt kann das konzentrierte Produkt am unteren Ende entnommen werden. Es ist jedoch streng darauf zu achten, dass nicht mehr entnommen wird, als die Kolonne tatsächlich nach unten transportiert. Entnimmt man zu viel, so sinkt die Konzentration wieder. Man kann sogar mit der Entnahmemenge die Konzentration am unteren Ende einregulieren.

Damit ist das Wesentliche über die $D_2$-O-Gewinnung ausgesagt. Alles weitere betrifft nur noch das Zubehör, d. h. all die Vorrichtungen und Apparate, welche notwendig sind, um diesen Stoffaustausch zu ermöglichen. Es ist erstaunlich, dass die eigentlichen Trennkolonnen nur einen kleinen Bruchteil der ganzen Anlage ausmachen. In Bild 4 sind die drei Verfahrensschritte der Emser Anlage schematisch dargestellt. Die Elektrolyseure der Ammoniaksynthese werden für die Schwerwassergewinnung in Stufen geschaltet. Jede Stufe erhält etwas mehr Wasser als durch den elektrischen Strom in die Komponenten Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt wird. Der Ueberschuss wird aus den erzeugten Gasen auskondensiert und als Speisewasser der nächsten Stufe zugeführt. Durch diesen Vorgang erhält man eine etwa siebenfache Voranreicherung. Das Vorkonzentrat, welches etwa 0,1 % $D_2O$ enthält, wird im letzten Elektrolyseur vollständig in Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt. Der Wasserstoff, es handelt sich um 400 $Nm^3/h$, wird in einem Zwischengasometer aufbewahrt und anschliessend in der Tieftemperaturanlage auf seinen Verflüssigungspunkt abgekühlt, bei etwa — 250 ° C verflüssigt und dann der Tieftemperatur-Rektifi-

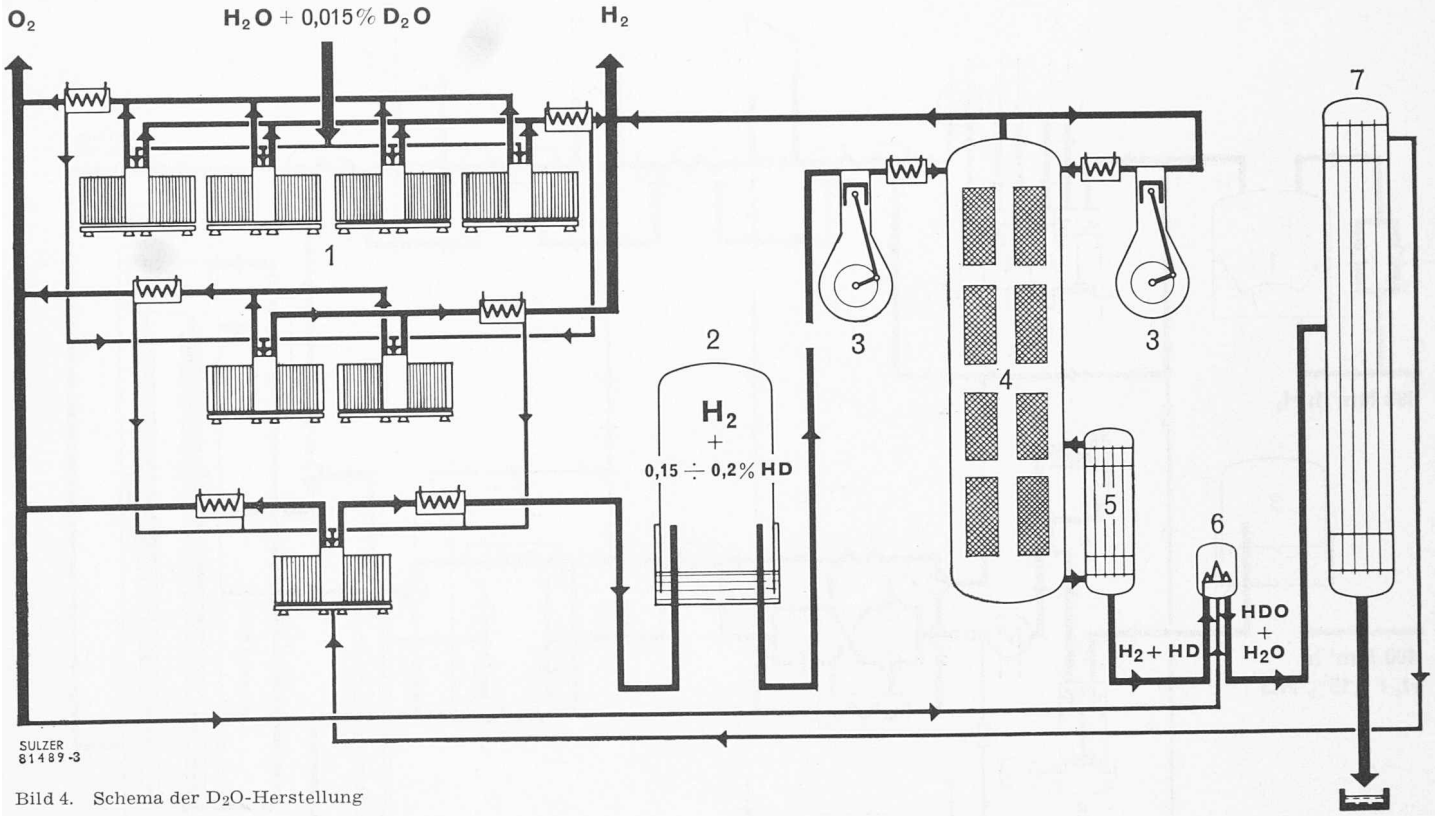



Bild 4. Schema der $D_2O$-Herstellung

1 elektrolytische Vorkonzentration
2 Gasometer
3 Kompressoren
4 Verflüssigung
5 Rektifikation
6 Verbrennung
7 $D_2O$-Rektifikation

$D_2O$ 99,8 %

zierkolonne zugeleitet. Bei diesen geringen Konzentrationen kommen die Deuteriumatome nur in Verbindung mit Wasserstoffatomen als sogenanntes Wasserstoffdeuterid HD vor. Weil das Gleichgewicht zwischen $H_2$, HD und $D_2$ eingefroren ist, kann man bei der Rektifikation im besten Falle 100prozentiges Deuterid erhalten, welches 50prozentigem $D_2$ entsprechen würde. In der beschriebenen Anlage geht man aber nur auf etwa 60prozentiges HD und verbrennt das der Kolonne entnommene Produkt in einem einfachen Knallgasbrenner. Das daraus entstehende 30prozentige Schwerwasser-Vorkonzentrat wird dann einer Schlussrektifiziersäule zugeführt, welche Wasser und Schwerwasser bei etwa 60 ° C, also unter Vakuum, rektifiziert und das gewünschte Produkt von 99,8 % Reinheit liefert.

Dieses kombinierte Verfahren hat den Vorteil, dass die beiden Rektifizierkolonnen unabhängig voneinander betrieben werden können. Ferner ist es möglich, in der Schlusskolonne irgendwelche Schwerwasserabfälle hoher Konzentration ohne grossen Mischungsverlust wieder aufzubereiten. Ein weiterer Grund, der zur Wahl dieses kombinierten Verfahrens geführt hat, war der, dass die einfache und betriebssichere Wasserrektifikation bereits bekannt und erprobt war und dadurch das Risiko bei der Erstausführung einer solchen Anlage wesentlich vermindert wurde. Allfällig mögliche Fehler in der Auslegung der Tiefsttemperaturkolonne können so durch die bekannte zweite Rektifikation wieder korrigiert werden.

### 3. Wirkungsweise der Tieftemperaturanlage

Bild 6 zeigt das Schema der eigentlichen Tieftemperaturanlage zur Rektifikation des flüssigen Wasserstoffes bei —251° C, bei einer Temperatur also, die nur 22° C über dem absoluten Nullpunkt liegt. Ganz rechts ist die Rektifizierkolonne 8 sichtbar, die als Kuhn-Kolonne ausgebildet ist. Sie besteht aus einer Serie von parallelgeschalteten Rohren, in welchen sich der Rektifizierprozess abspielt. Um die Kolonne betreiben zu können, ist eine Kälteanlage zur Abkühlung der Kolonne und zur Verflüssigung des Wasserstoffs erforderlich. Diese umfasst einen Kompressor, Wärmeaustauscher und Expansionsturbinen.

Ein ölfreier dreistufiger Kolbenkompressor 2 verdichtet das Wasserstoffgas auf einen Druck von etwa 14 ata. Dann wird es der Reihe nach in Wärmeaustauschern durch das rückfliessende Gas und in Expansionsturbinen 7 durch Energieabgabe an die Turbinenwelle bis auf den Verflüssigungspunkt des Wasserstoffes heruntergekühlt. Der letzte Wärmeaustauscher arbeitet dabei als gewöhnlicher Thomson-Joule-Austauscher, wie bei Luftverflüssigungsanlagen. Der bereits etwas feuchte Wasserstoff wird in den untern Teil der Kolonne zur Beheizung der Blasen der einzelnen Rektifizierrohre eingeführt, wobei er sich unter Wärmeabgabe an die Rohre verflüssigt. Die Flüssigkeit wird gesammelt, in einem weiteren Wärmeaustauscher unterkühlt und oben an der Kolonne

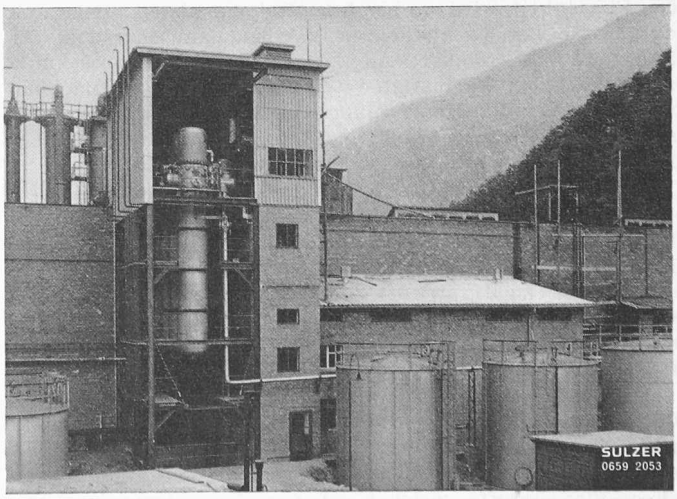



Bild 5. Gebäude der Tieftemperaturanlage in den Emser Werken. Im rechten niedrigen Bau sind die Kompressoren untergebracht, links im Freien vier grosse Vakuumbehälter, welche die Wärmeaustauscher der Tieftemperaturanlage und die Kolonne enthalten. Im mittleren Gebäudeteil Kommandoraum und Rektifizierkolonne zur Schlussanreicherung

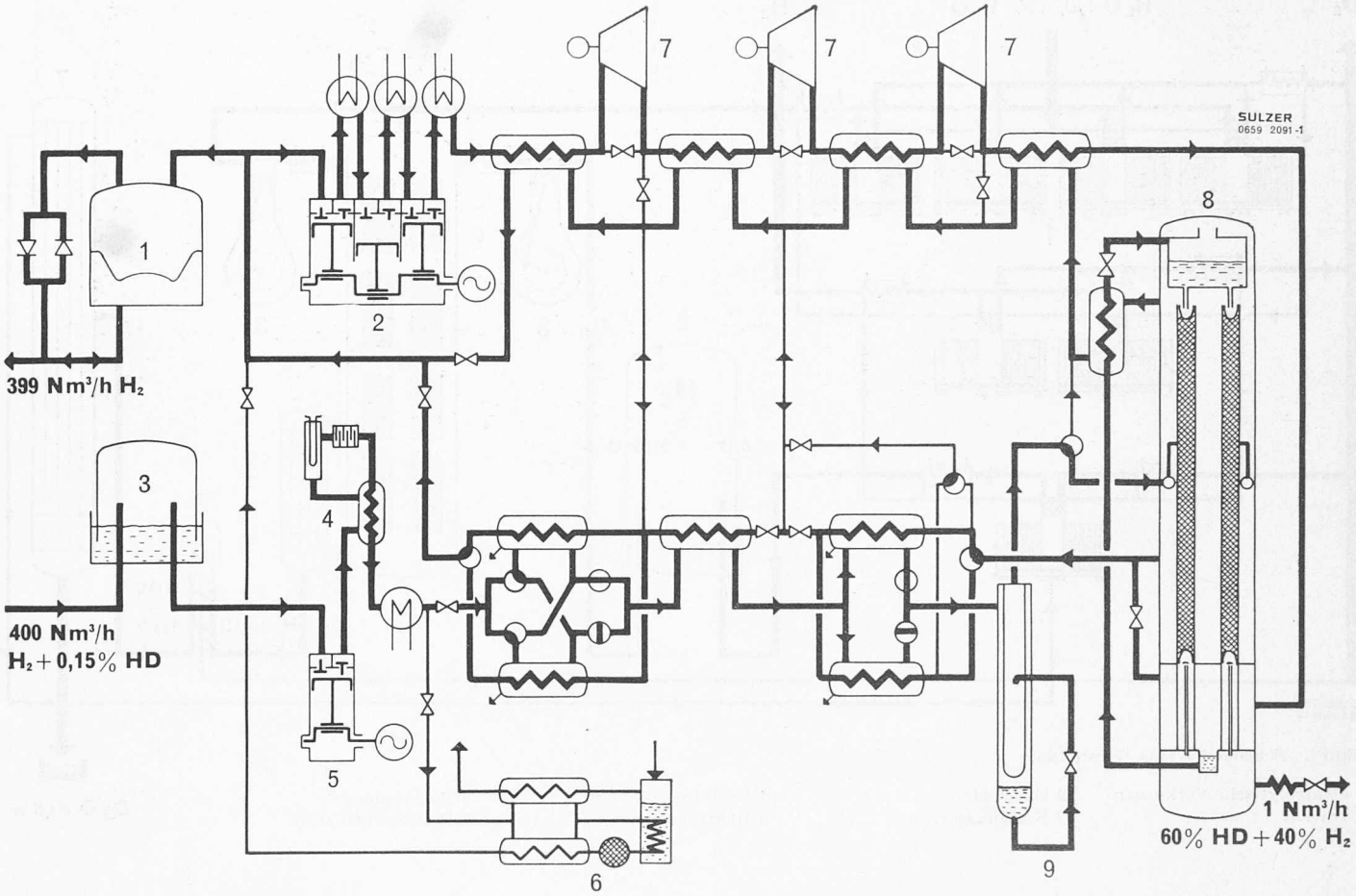



Bild 6. Schema der $H_2$-HD-Rektifizieranlage

1 Trockengasometer
2 Umlaufkompressor
3 Feed-Gasometer
4 $O_2$-Entfernung
5 Feed-Kompressor
6 Reinigungsanlage
7 Expansionsturbinen
8 Kuhn-Kolonne
9 Feed-Verflüssiger

nach Entspannung in einen Behälter eingeführt. Von diesem aus rieselt der flüssige Wasserstoff durch einzelne Kapillaren gleichmässig verteilt durch die Rektifizierrohre und nimmt im Austausch mit dem aufsteigenden Dampf Deuterium auf. Unten an den Rohren angelangt, wird er durch den sich auf der Aussenseite kondensierenden, wärmeabgebenden Wasserstoff wieder verdampft. Der Dampf strömt durch die Rohre zurück im Gegenstrom zu der herabfliessenden Flüssigkeit, wird am Kopf der Kolonne abgenommen und durch alle bereits erwähnten Wärmeaustauscher auf die Saugseite des Kompressors zurückgeführt. Er unterkühlt also zuerst den verflüssigten Wasserstoff und gibt nachher seine Kälte an den frisch ankommenden Wasserstoff ab, um sich selbst wieder bis auf Raumtemperatur zu erwärmen. Damit ist der eigentliche Kältekreislauf geschlossen.

Es ist ersichtlich, dass gegen aussen fast keine Kälteleistung abgegeben werden muss, ausgenommen die Kälteverluste der Anlage. Eine gleiche Wasserstoffmenge, die im Heizmantel unten an der Kolonne verflüssigt wird, verdampft gleichzeitig wieder auf der Innenseite der Rohre. Obschon in der Anlage über 1000 l/h flüssiger Wasserstoff erzeugt werden, genügt eine verhältnismässig kleine Kälteleistung.

Das an Deuterium reiche Produkt wird am unteren Ende der Rohre durch Kapillaren entnommen. Eine entsprechende Deuteriummenge muss den einzelnen Rohren in halber Höhe ständig zugeführt werden. Das ist der vorangereicherte «Feed-Wasserstoff», welcher von der Elektrolyseanlage anfällt. Er enthält aber noch eine beträchtliche Anzahl von Verunreinigungen und muss deshalb, bevor er in die Kolonne eingeführt wird, nicht nur abgekühlt, sondern auch noch gereinigt werden. Ein Feed-Kompressor 5 verdichtet ihn auf etwa 3,7 ata. Dann wird ihm in einem katalytischen Kontaktofen 4 der Sauerstoff entnommen, der sich mit Wasserstoff zu Wasser vereinigt. Anschliessend gelangt der Feed-Wasserstoff in zwei austauschbare Wärmeaustauscher, in denen er durch rückfliessendes Gas auf etwa — 100 ° C gekühlt wird, wobei praktisch alles Wasser ausfriert. Es ist immer nur einer der beiden Austauscher in Betrieb, während der zweite durch das frisch ankommende Gas aufgetaut wird. Nach einem weiteren Austauscher, welcher den Feed auf etwa — 200 ° C kühlt, kommen wiederum zwei umschaltbare Austauschelemente, denn jetzt ist die Sättigungstemperatur des Stickstoffes erreicht. Auch der Elektrolysewasserstoff kann noch etwa 2 ‰ Stickstoff enthalten, der in einem der letzten beiden Austauscher ausgefroren wird. Hat sich eine genügende Menge Stickstoff angesammelt, so wird der zweite Austauscher in Betrieb genommen, der erste abgetaut und der Stickstoff flüssig abgelassen. Als letzte Reinigungsstufe wird die gesamte Feed-Menge in einem Feed-Verflüssiger 9 verflüssigt und wieder verdampft. Der Feed-Verflüssiger besteht im wesentlichen aus einem einfachen Rohr, auf dessen Aussenseite der Wasserstoff kondensiert. Die Flüssigkeit wird hierauf entspannt, auf der Innenseite aufgegeben, wo sie gleich wieder verdampft, und bei dieser Verdampfung bleiben noch die letzten Unreinigkeiten zurück. Der Feed-Verflüssiger verhindert eine Verstopfung der Feed-Kapillaren und der Kolonne.

Wenn man die Gesamtbilanz der Stoffmengen betrachtet, so wird durch den Feed-Kompressor eine Menge von etwa 400 Nm³/h Wasserstoff eingeführt, von der 1 Nm³/h unten an der Kolonne entnommen werden kann, während 399 Nm³/h durch die Feed-Wärmeaustauscher wieder zurückfliessen, sich mit dem Wasserstoff, der zur Kälteerzeugung gedient hat, vereinigen und schliesslich zur Ammoniaksynthese gehen.

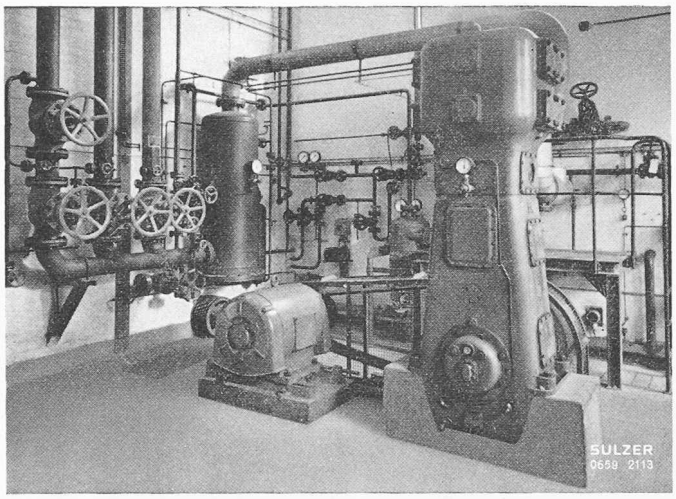



Bild 8. Feed-Kompressor

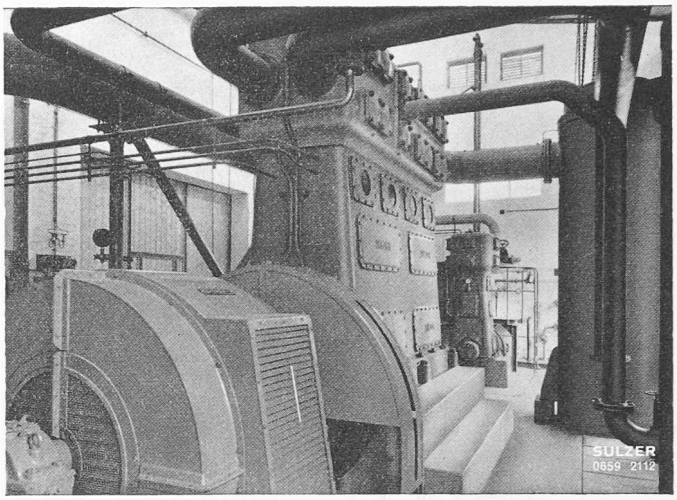



Bild 9. Umlaufkompressor

Das Verfahren entnimmt einem Wasserstoffstrom, der einer anderen Fabrikation dient, eine kleine Menge Deuterium, sozusagen im Vorbeigehen, und ist deshalb Nutzniesser der elektrolytischen Voranreicherung, deren Betriebskosten zu Lasten der Ammoniaksynthese gehen.

Auf Bild 6 ist ganz unten noch eine Reinigungsanlage 6 ersichtlich, welche für die erste Inbetriebsetzung der Anlage benötigt wird. Es ist ausserordentlich wichtig, dass im Kältekreislauf nur absolut reines Gas zirkuliert, weil sich sonst die Expansionsturbinen mit Eis verstopfen könnten. Für die erste Füllung der Anlage wird deshalb der Wasserstoff mit flüssiger Luft gekühlt und über einem Aktivkohlefilter gereinigt. Ein Trockengasometer dient zur Aufbewahrung dieser reinen Füllung während einem Stillstand der Anlage.

Im Entropiediagramm Bild 7 ist der Kälteprozess entsprechend dem Schema Bild 6 eingetragen. Die erste Entspannung des Gases nach der dreistufigen Kompression erfolgt in zwei in Serie geschalteten Turbinen, so dass insgesamt vier Turbinen vorhanden sind, von denen zwei unter der Temperatur der flüssigen Luft und eine nur etwa 30 ° über dem absoluten Nullpunkt arbeiten. Im Gegensatz zu bekannten Gasverflüssigungs- oder Trennanlagen sind hier alle Turbinen in Serie geschaltet, und jede wird von der gesamten Gasmenge des Umlaufkompressors durchströmt.

## 4. Die einzelnen Bauteile der $D_2O$-Anlage

*a) Kompressoren*

Die beiden Kompressoren der Anlage arbeiten absolut ölfrei [1]). Die Kolbenstange ist ausserhalb des Zylinders an zwei Stellen geführt und ragt frei schwebend in den Zylinderraum hinein. Der Kolben besitzt auf der Aussenseite zur Abdichtung nur Labyrinthrillen, und auch die Stopfbüchse ist mit Labyrinthringen ausgestattet, so dass das geförderte Gas nirgends mit Oel in Berührung kommen kann. Da keine Stopfbüchsverluste zulässig sind, ist in Ems der ganze Kurbelraum gasdicht abgeschlossen und über eine Oelfalle mit dem Gasometer verbunden. Diese Oelfalle ist aber praktisch nicht belastet, weil der Gasometerdruck konstant ist und daher immer das gleiche Gas im Kurbelgehäuse bleibt. Eine Zwischenanzapfung bei der Stopfbüchse sorgt dafür, dass die Leckverluste direkt auf die Saugseite der Zylinder zurückgeführt werden und gar nicht in den Kurbelraum gelangen.

Bild 8 zeigt den Feed-Kompressor. Auffallend gross erscheint die Ventilstation auf der Saugseite der Maschine. Sie ergibt sich daraus, dass wahlweise Stickstoff, gewöhnlicher oder angereicherter Wasserstoff angesaugt werden muss, je nachdem ob die Anlage im normalen Betrieb steht oder zu Revisionszwecken mit Stickstoff gespült werden muss.

Der Umlaufkompressor (Bild 9) der Kälteanlage ist, wie bereits erwähnt, eine dreistufige Maschine. Er ist mit dem Antriebsmotor von 3000 V direkt gekuppelt. Auch dieser Kompressor ist mit vollständig geschlossenem Kurbelgehäuse gebaut. Die Verwendung von ölfreien Kompressoren hat die Ausführung der Tiefsttemperaturanlage wesentlich erleichtert, indem dadurch alle Reinigungsvorrichtungen zur Entfernung des Oelnebels nach dem Kompressor wegfallen und keine Gefahr der Verschmutzung der Wärmeaustauscher und der Kolonne besteht.

*b) Vakuumisolierung der Wärmeaustauscher*

Ein Hauptproblem bei der Konstruktion der Anlage war die Anordnung und Isolierung der Wärmeaustauscher und

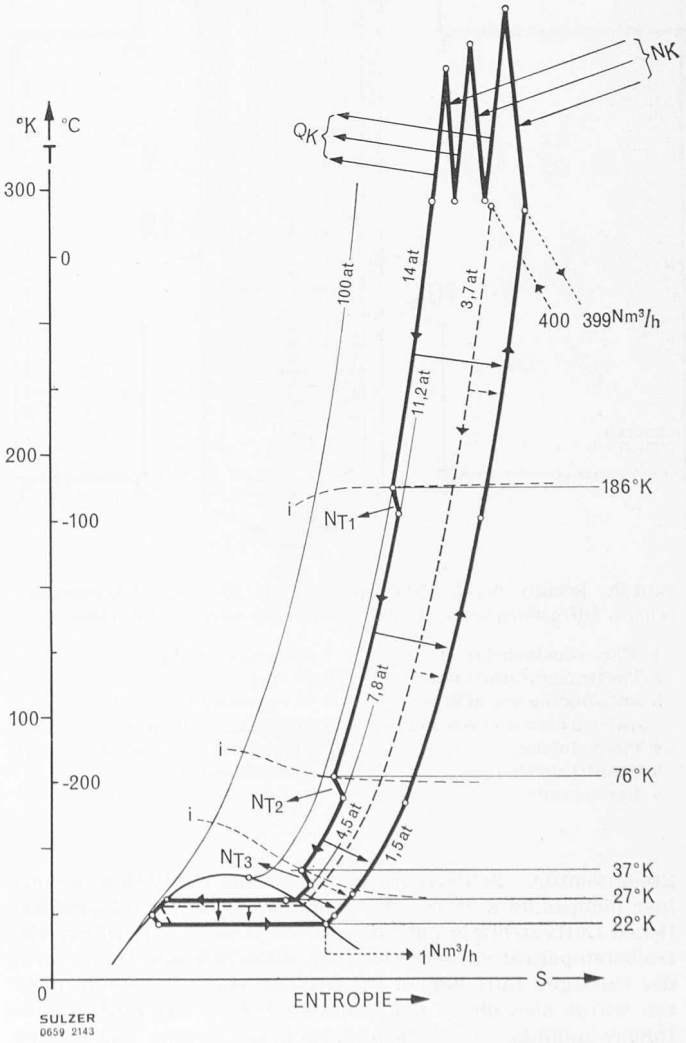



Bild 7. *T-S*-Diagramm des Kälteprozesses

[1]) «Techn. Rundschau Sulzer» 1958 Nr. 2, S. 3: *U. Ritter*. Der Labyrinth-Kolbenkompressor für ölfreie Förderung.

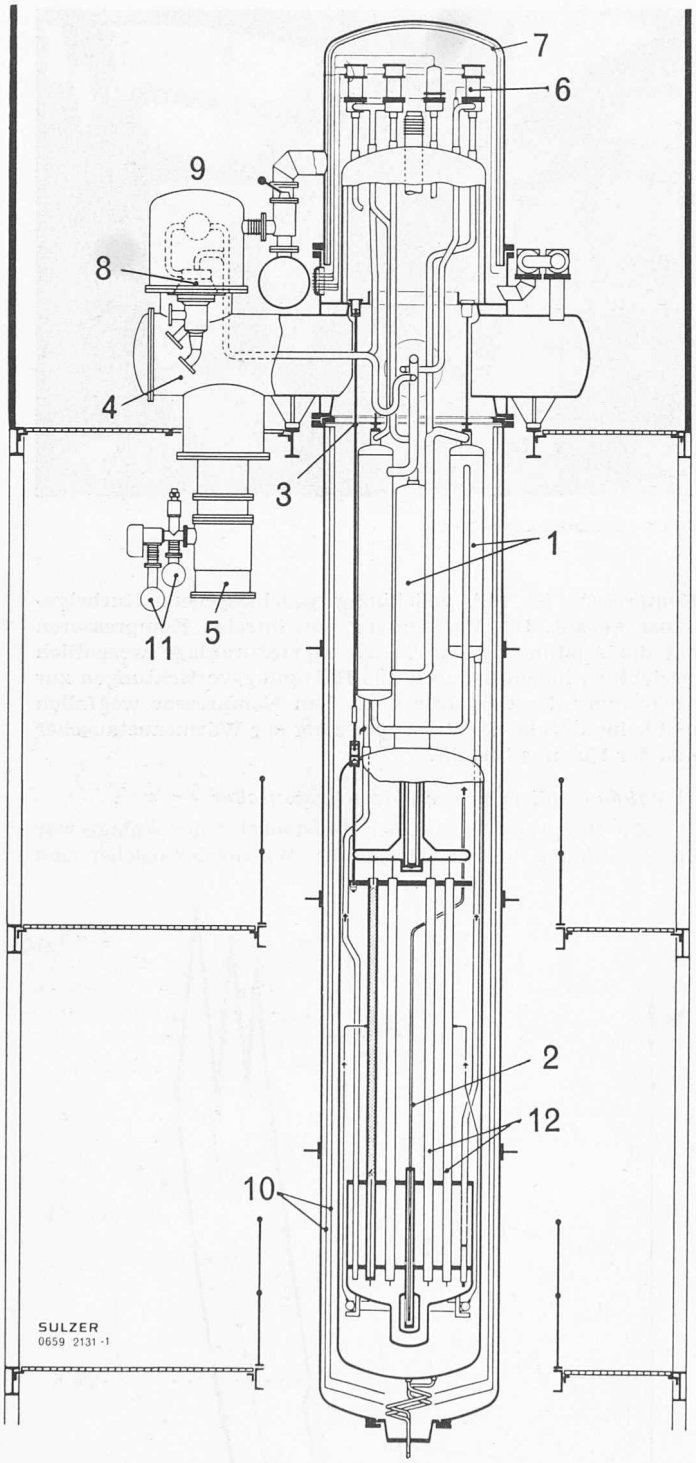



Bild 10. Schnitt durch Vakuumkessel mit Kolonne, Wärmeaustauschern, Diffusionspumpe, Regelventilen und Expansionsturbine

1 Wärmeaustauscher
2 Tieftemperaturkolonne
3 Aufhängung von Wärmeaustauschern und Kolonne
4 Pumpstutzen
5 Oeldiffusionspumpe
6 Regelventile
7 Armaturenhaube
8 Turbine
9 Turbinenhaube
10 Strahlungsschutzbleche
11 Vorvakuumkollektoren
12 Rektifizierrohre

Steuerventile. Schlacken- oder Steinwolleisolation konnte hier nicht ohne weiteres verwendet werden, wie bei gewöhnlichen Luftverflüssigungsanlagen, da ja in ⅔ der Anlage Betriebstemperaturen herrschen, die unterhalb der Temperatur der flüssigen Luft liegen. Bei noch so starken Isolierschichten würde sich die in der Isolation befindliche Luft an den Innenwandungen kondensieren. Es müsste sogar eine gefährliche Sauerstoffanreicherung befürchtet werden, die bei irgendwelchen Wasserstoffverlusten zu Explosionen führen könnte. Der Vorschlag, die Isolation mit Wasserstoff zu füllen, ist abzulehnen, da dessen Wärmeleitfähigkeit etwa siebenmal grösser ist als die der Luft.

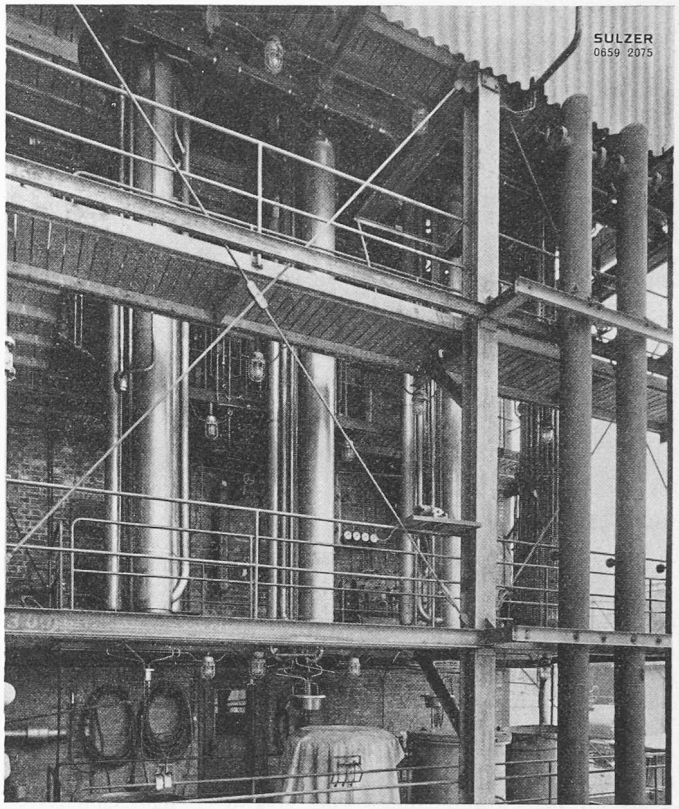



Bild 11. Gesamtbild aller Wärmeaustauscher. Die Vakuumkessel sind abgesenkt

Um alle diese Schwierigkeiten zu umgehen, wurde eine reine Vakuumisolation gewählt. Man war sich bewusst, dass es kein leichtes sein würde, derart grosse Apparate hochvakuumdicht herzustellen, besonders wenn sie Wasserstoff unter Druck enthalten. Für eine gute Isolationswirkung ist ein Vakuum von mindestens $10^{-3}$ Torr, also ein Druck von rund einer Millionstel Atmosphäre notwendig. Die Vorteile sind aber derart verlockend, dass sich das Wagnis lohnte. Bei der Hochvakuumisolation, d. h. sobald die freie Weglänge grösser ist als die Abstände zwischen den einzelnen Apparaten, spielen diese Abstände überhaupt keine Rolle mehr. Es ist also möglich, die ganze Anlage sehr kompakt zusammenzubauen. Zudem muss beim Kaltfahren der Anlage nicht noch tonnenweise Isolationsmaterial mitabgekühlt werden, was die Anfahrzeit wesentlich verkürzt.

Ein zweiter grundlegender Entscheid für die Konstruktion bestand darin, alle Regelventile mit Druckgas fernzusteuern. Bisher war es bei den meisten Tieftemperaturanlagen üblich, die kalten Ventile durch entsprechend lange Spindeln mit Handrädern am Aussenmantel der Anlage zu verbinden. Dadurch werden jedoch der Anordnung der Regelventile enge Grenzen gesetzt, und die grosse Anzahl von Spindeln führt zu zusätzlichn Wärme- und Leckverlusten. Bei servogesteuerten Ventilen, deren Servomotor sich ebenfalls im Bereich der tiefen Temperatur befindet, müssen nur zwei dünne Leitungen nach aussen geführt werden, während das Ventil selbst an jeder beliebigen Stelle montiert sein kann.

Bild 10 gibt einen Querschnitt durch einen Vakuumkessel der Anlage, und zwar denjenigen, der die Kolonne enthält. Die ganze Anlage umfasst vier solcher Einheiten. Die erste enthält die Austauscher bis auf — 100 ° C, die zweite diejenigen bis auf — 200 ° C, die dritte den Feed-Verflüssiger und die letzten Feed-Wärmeaustauscher und die vierte schliesslich die Kolonne.

Alle Kessel sind grundsätzlich gleich aufgebaut. In einem unteren Raum sind die Wärmeaustauscher 1 und die Ko-

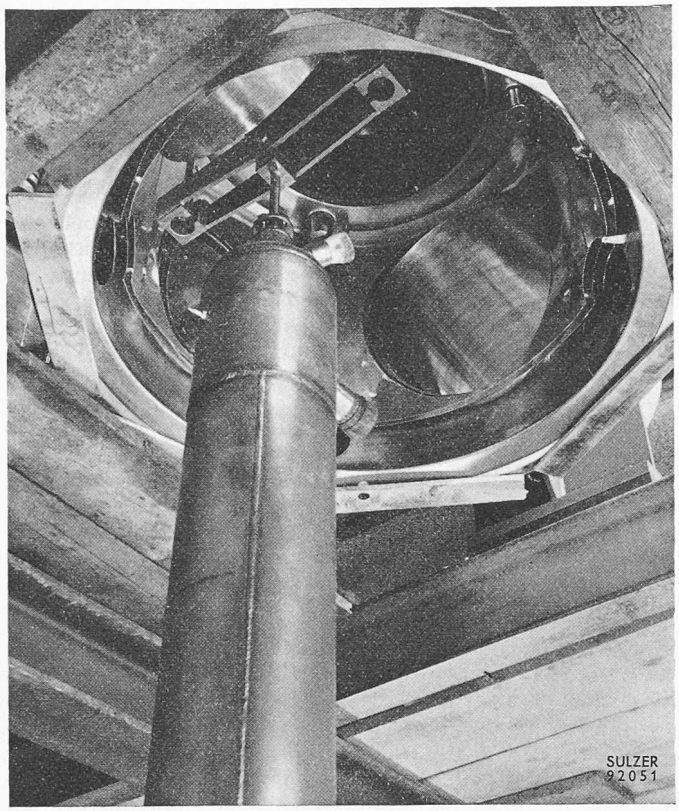



Bild 12. Der Kesselträger, von unten her gesehen, als tragendes Element einer Einheit, mit einem eingehängten Wärmeaustauscher

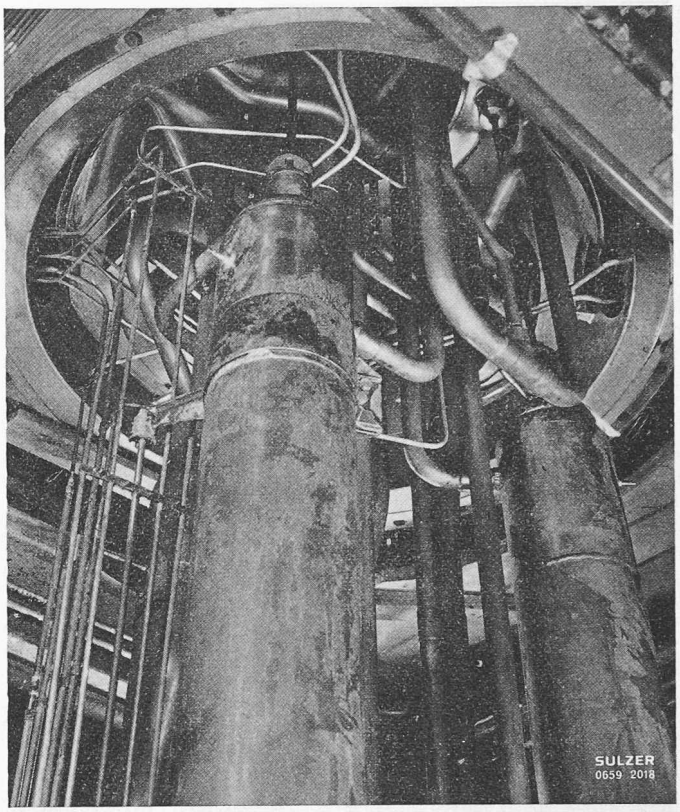



Bild 13. Wie Bild 12, jedoch nach Fertigmontage

lonne 2 aufgehängt. Alle diese Apparate hangen an langen, dünnen rostfreien Stahlstangen 3. Da rostfreier Stahl eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit hat, sind die Wärmeeinfälle bei dieser Konstruktion sehr klein. Durch den seitlich angebrachten Stutzen 4 ist der Kessel mit einer Oeldiffusionspumpe 5 verbunden. Im Kessel sind jedoch keine Flanschverbindungen oder irgendwelche andere mechanisch lösbare Verbindungen vorhanden. Sämtliche Rohrleitungen sind verschweisst oder verlötet. Alle Teile, die Flanschverbindungen enthalten, vor allem die Steuerventile 6, sind im oberen Teil der Einheit unter einer besondern Haube 7 montiert. In diesem oberen Raum wird nur ein Grobvakuum aufrechterhalten; denn man muss damit rechnen, dass einzelne Flanschen mit der Zeit Wasserstoffverluste aufweisen. Zur guten Isolation ist dafür diese obere Haube doppelwandig ausgeführt und der Zwischenraum ist wie bei einem Dewar-Gefäss auf Hochvakuum ausgepumpt.

Die Turbinen 8 sitzen seitlich auf dem Ansaugrohr der Diffusionspumpen ebenfalls unter einer Vakuumhaube 9. Um die Strahlungsverluste tunlichst klein zu halten, sind innerhalb aller Vakuumkessel Strahlungsschutzbleche 10 aus Aluminium angebracht.

Bei Montage- und Demontagearbeiten können einfach die grossen Vakuumkessel nach unten abgesenkt und die Armaturenhauben nach oben entfernt werden. Die einzelnen Anlageteile sind dann von den Podesten aus frei zugänglich. Das Absenken der Vakuumkessel benötigt wesentlich weniger Zeit als z. B. die Entfernung einer Schlackenwolleisolation. Die Bilder 11, 12 und 13 lassen den grundsätzlichen Aufbau erkennen.

*c) Servogesteuerte Ventile für tiefste Temperaturen*

Eine ausgiebige Entwicklungsarbeit ermöglichte die Konstruktion von servogesteuerten Umschalt- und Regelventilen, die auch bei den tiefsten Temperaturen zuverlässig funktionieren. Bild 14 zeigt ein Dreiwegventil mit Tieftemperatur-Servomotor im Schnitt. Das aktive Element des Servomotors ist ein Faltenbalg, der seine Kraft über eine Glocke auf die zentrale Spindel überträgt. Diese betätigt den Ventilteller. Sämtliche Dichtstellen sind metallisch und werden mit Dehnschrauben angezogen, die auch bei grossen Temperaturänderungen noch einen genügenden Dichtungsdruck gewährleisten. Die Servomotorfeder kann in beiden Richtungen wirkend eingebaut werden, so dass das Ventil in druckloser Lage immer die gewünschte Stellung einnimmt. Für die Betätigung des Servomotors kommt natürlich nur Wasserstoff in Frage, weil ja Luft sich verfestigen würde. Aber auch mit Wasserstoff besteht die Gefahr, dass er sich bei auf ganz tiefem Temperaturniveau arbeitenden Servo-

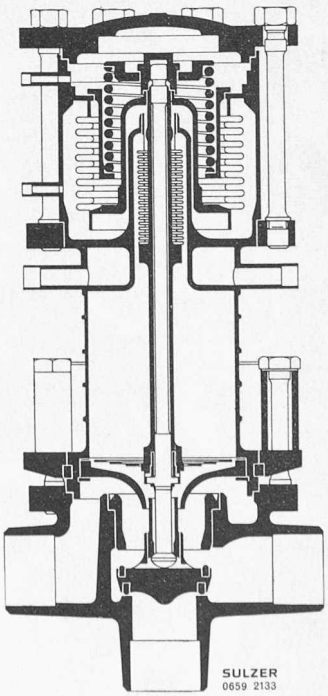



Bild 14. Dreiwegventil mit Tieftemperatur-Servomotor

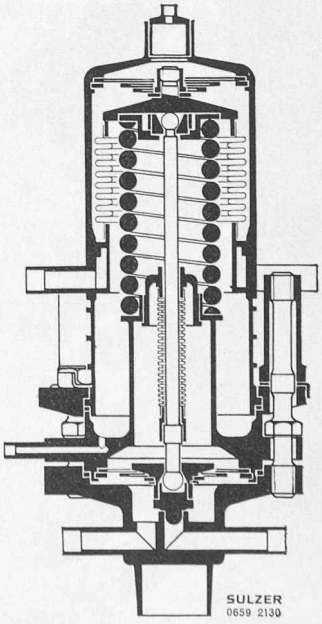



Bild 15. Regelventil für flüssigen Wasserstoff

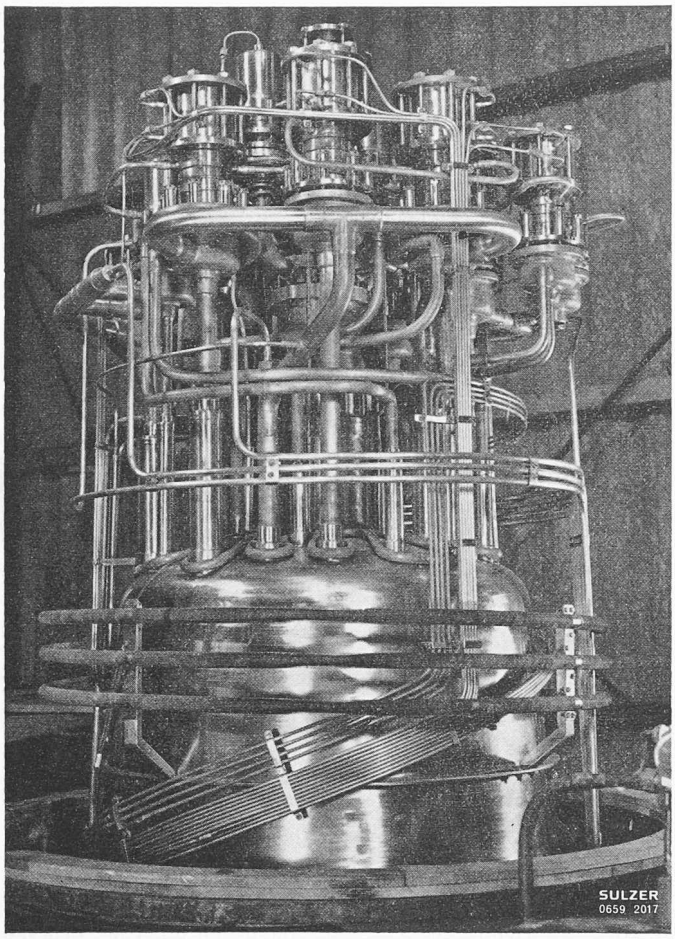



Bild 17. Ventilaufbau von der Seite gesehen. Zu beachten ist der kalte Kesselboden, der die Ventile trägt und selbst durch einen dünnwandigen rostfreien Stahlzylinder auf dem warmen Kesselträger abgestützt ist. Ferner ist eine Heizschlange sichtbar zum Aufwärmen des ganzen Armaturenraumes bei Revisionen, sowie die Steuerleitungen und die Heizleitung für alle Servomotoren

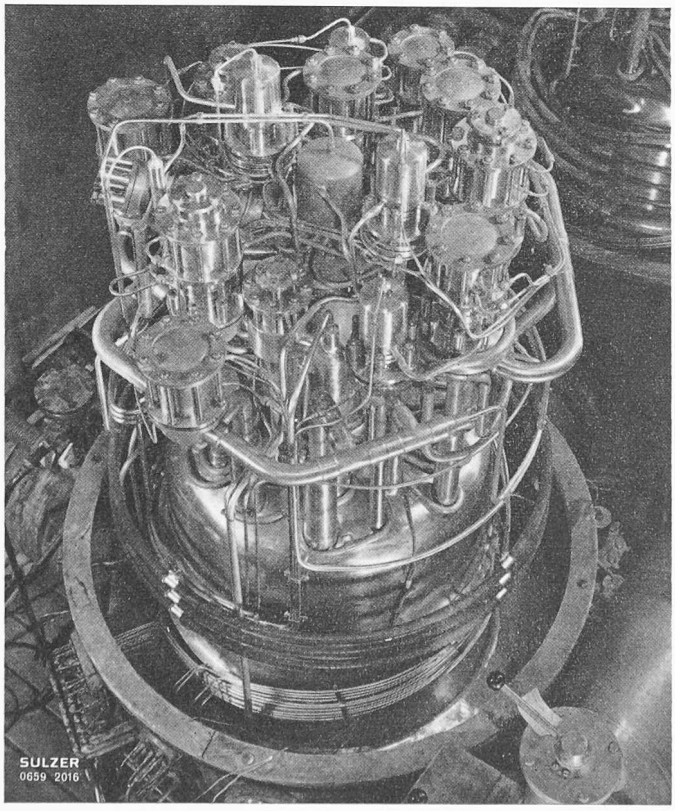



Bild 16. Aufbau der Ventile. Wie auf dem Schnittbild 10 sichtbar ist, werden alle Ventile am Kopf der Kesseleinheit unter der Armaturhaube zusammengebaut. Es wäre unmöglich, handgesteuerte Ventile in einem ebenso engen Raum unterzubringen

motoren verflüssigt. Deshalb wird der Servomotor durch einen dünnwandigen rostfreien Stahlzylinder vom Ventil getrennt und der Servomotor durch eine Gasheizung stark erwärmt, so dass das Steuergas nicht mehr kondensieren kann und trotzdem die Verluste nicht zu gross sind.

Die Regelventile sind in ähnlicher Weise konstruiert. Das in Bild 15 dargestellte Ventil ist für flüssigen Wasserstoff bestimmt. Während beim Dreiwegventil nur zwei Endlagen einzustellen sind, muss ein Regelventil jede beliebige Lage einnehmen, die sich von aussen eindeutig bestimmen lässt. Um dies zu erreichen, arbeitet das ganze Ventil absolut reibungsfrei. Die Spindeln sind durch elastische Federglieder gehalten, und der kontinuierlich regulierbare Steuerdruck, der auf den Balg wirkt, arbeitet gegen eine Feder, so dass die Höhe des Steuerdruckes unmittelbar die Federspannung und damit die Ventilstellung bestimmt. Auch hier ist der Servomotor vom Ventil entfernt angeordnet und wird geheizt. Bilder 16 und 17 zeigen die Anordnung der Ventile am Kopf einer Kesseleinheit. *Schluss folgt*

## Der Schweizerische Werkbund zur Landesausstellung 1964

DK 061.2:061.4

Die Probleme der Planung, Wohnung und Ausstattung beschäftigten den Schweizerischen Werkbund an seiner Jahresversammlung vom 7. November 1959 in Bern. Er bestimmte einen Ausschuss mit Prof. *A. Roth, M. Bill, R. Gutmann* und *R. P. Lohse,* der die Referate von Dr. *R. Steiger* über Orts-, Regional- und Landesplanung, Prof. Dr. *W. M. Moser* über die Wohnung und M. Bill über die Ausstattung sowie die Einleitung von Prof. A. Roth und das Ergebnis der Diskussion zusammenfassen und auswerten musste. Die kleine Schrift, die die aktuellen Forderungen des Schweizerischen Werkbundes festhält, wurde der Direktion der Landesausstellung 64 als Anregungen und Vorschläge des SWB überreicht.

Der SWB begrüsst die Devise «La Suisse dans le monde de demain», die mit einer kritisch-konstruktiven Analyse und einem Ausblick in die wünschbare Entwicklung der Schweiz geeignet erscheint, die mit der Existenz und Weiterexistenz der Schweiz zusammenhängenden Grundfragen zu stellen und Lösungsmöglichkeiten zu zeigen. Er regt an, diesen wohl wichtigsten Problemkreis unseres Landes an der kommenden Landesausstellung gründlich zu behandeln. Im Einverständnis mit dem S. I. A. und dem BSA sind die aktuellen Forderungen der Umweltgestaltung (Gerät, Wohnung, Quartier, Stadt, Region und Land) so zur Darstellung zu bringen, dass sich die Ausstellungsbesucher der zentralen Bedeutung dieser Aufgabe bewusst werden. Die Schweiz wird immer hässlicher, der rapide Wachstumsprozess macht eine Verdichtung der Bebauung unumgänglich, die Ausscheidung von Landwirtschaftszonen und Zonen für die Erholung wird nötig, die Orts- und Regionalplanung gewinnt an Bedeutung, die Verkehrsplanung hat auf die Besiedlung Rücksicht zu nehmen, die zügellose Bodenspekulation verunmöglicht die weitsichtige Entwicklung von Gemeinden, Kantonen und Bund.

Die Landesausstellung 1964 soll Mittel und Wege zeigen, wie die Planung in der zukünftigen Schweiz verankert werden kann. Dazu soll eine Arbeitsgruppe eingesetzt werden, die (eventuell unter Beizug ausländischer Fachleute) das Programm für die Bearbeitung einer Abteilung der Ausstellung an die Hand nimmt. Für die Behandlung der Probleme der Wohnung mit den Elementen der Quartiere (Kindergärten und -spielplätze, Schulen, Parks, Läden, Restaurants, Bildungs- und Vergnügungsstätten, Kirchen, Werken der Kunst usf.) und den praktischen, psychologischen, technischen, wirtschaftlichen und ästhetischen Anforderungen ist ebenfalls ein besonderer Ausschuss zu wählen, der sich auch um die Darstellung der «Wohnung» bemüht. Die Aus-