

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 72 (1954)
Heft: 7

Artikel: Brennstoffzusätze zur Verhinderung von Oelrasche-Ablagerungen in Gasturbinen
Autor: Sulzer, Peter T.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-61137>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.03.2025

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

Brennstoffzusätze zur Verhinderung von Oelasche-Ablagerungen in Gasturbinen

Von Ing. Dr. sc. nat. Peter T. Sulzer, Winterthur

DK 621.438.057

Die primäre Ursache der Verschmutzung und der Korrosionen beim Betrieb von Gasturbinen mit Schweröl ist bekanntlich dem oft beträchtlichen Gehalt dieser Brennstoffe an Vanadium, Schwefel, Natrium usw. zuzuschreiben. Darüber und auch über den Einfluss weiterer Faktoren, wie die

Vollständigkeit der Verbrennung, wurde schon von verschiedenen Autoren z. T. auf Grund von Betriebserfahrungen an Gasturbinenanlagen berichtet*). Dagegen sind bis jetzt nur wenige Mitteilungen über die technische Anwendung von Brennstoffzusätzen zur Verhinderung der erwähnten Schwierigkeiten veröffentlicht worden.

Zur Bestimmung der ungefähren Verschmutzungsintensität, die in verschiedenen Gasturbinensystemen zu erwarten ist, führten Gebrüder Sulzer systematische Versuche in ihrer Hochdruck-Versuchsbrennkammer durch, wobei diese Intensität in Abhängigkeit vom Druck p , vom Luftfaktor λ , von der Zeit z , vom Aschegehalt des Brennstoffes α und von der absoluten Temperatur T gemessen wurde. Darnach kann die abgelagerte Aschemenge G in guter Näherung durch die Gleichung

$$G = C_1 \cdot \alpha \cdot z \cdot \frac{p}{\lambda} \cdot e^{\frac{C_2}{T}}$$

ausgedrückt werden. Sie sagt aus, dass das Ausmass der Verschmutzung bei vollständiger Verbrennung proportional mit der Zeit z , dem Aschegehalt α des Brennstoffes und der Konzentration p/λ zunimmt. Der Exponentialfaktor erklärt sich durch die starke Temperaturabhängigkeit der Plastizität der auftreffenden Ascheteilchen. Die Konstanten C_1 und C_2 sind von der chemischen Zusammensetzung der Oelasche, der Strömung und anderen Faktoren abhängig.

Für Brennstoffe, deren Aschemenge und Aschezusammensetzung den meisten heute gangbaren Schwerölqualitäten entsprechen, ergibt die Formel eine befriedigende Übereinstimmung. Sie gilt nur im Temperaturbereich von etwa 400 bis 750 ° C. Oberhalb 750 ° C fallen die Ablagerungen zusammen mit Zunder ständig ab. Sie vernachlässigt ferner sämtliche Vorgänge von meist untergeordneter Bedeutung, wie die Kondensation flüchtiger Aschekomponenten, die Druckabhängigkeit der chemischen Gleichgewichte usw.

Es ist bekannt, dass die Verbrennung von Schweröl mit niedrigem Aschegehalt ohne weitere Zusatzstoffe unter Einhaltung einer geeigneten Verbrennungsführung (unvollständige Verbrennung) in offenen Anlagen möglich ist. Trotzdem müssen diese Turbinen in vielen Fällen, besonders bei höheren Eintrittstemperaturen, periodisch gewaschen oder mechanisch gereinigt werden. Ausserdem ist die Gefahr von Russablagerungen in den Leitungen und Wärmeaustauschern nicht zu unterschätzen.

Im Gasturbinenprozess mit hohem Druck, besonders bei kleinem Luftfaktor (grosses p/λ) und hohen Temperaturen ist naturgemäss mit einer noch stärkeren Verschmutzung zu rechnen. Das bringt auch die oben angegebene Formel zum Ausdruck. Das Problem der Bekämpfung der Ascheablagerungen ist daher für diese Prozesse von grösster Bedeutung. Eine Beeinflussung der Verbrennung zwecks Verminderung der Ascheablagerung (durch Russbildung) ist hier wegen der Gefahr, dass abgelagerter Russ in Brand gerät, noch gefährlicher als bei tieferen Drücken.

Diese besonderen Umstände sowie weitere Momente allgemeiner Natur, z. B. die in Zukunft zu erwartende Verschlechterung

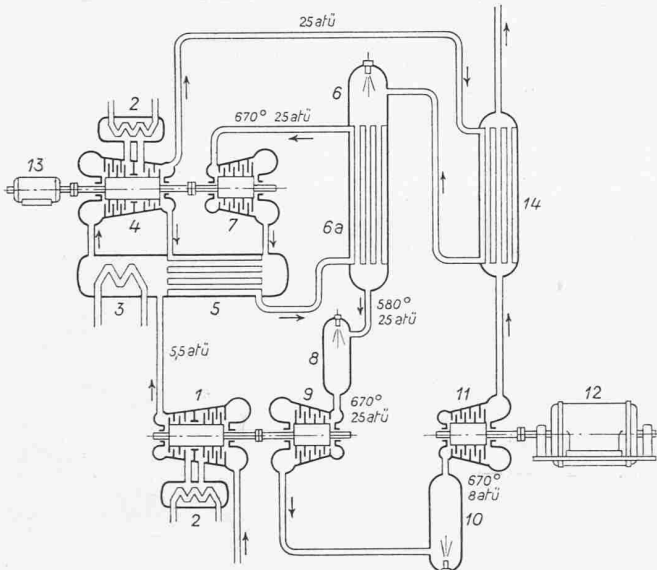


Bild 1. Prinzipschema des halboffenen Prozesses der Gasturbinenanlage Weinfelden von 20000 kW

- | | |
|-------------------------|------------------------------|
| 1 Niederdruckverdichter | 7 Luftturbinen |
| 2 Zwischenkühler | 8 Zweite Brennkammer |
| 3 Rückkühler | 9 Hochdruckturbinen |
| 4 Hochdruckverdichter | 10 Dritte Brennkammer |
| 5 Luftrekuperator | 11 Nutzturbinen (zweistufig) |
| 6 Hauptbrennkammer | 12 Generator |
| 6a Luftherhitzer | 13 Anwurfmotor |
| | 14 Gasrekuperator |

*) Ueber den korrosionsvermindernden Einfluss verschiedener Zusätze zum Brennstoff wurden von Escher Wyss AG., Zürich, grundlegende Untersuchungen durchgeführt. Siehe u. a. W. Stauffer «Schweiz. Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik», Bd. 17 (1951), S. 353.



Bild 2. Die Gasturbinenanlage Weinfelden. Legende siehe Bild 1

der Schweröle (grössere Aschemengen), veranlassten die Firma Gebrüder Sulzer, eine besonders intensive Forschung zur Entwicklung von Brennölszusätzen in die Wege zu leiten. Solche Zusätze sollen einerseits die Ablagerung von Oelaschen möglichst vollständig verhindern und andererseits die gefürchtete Korrosion durch Vanadiumpentoxyd auf ein erträgliches Mass herabsetzen. Auf Grund der bisherigen Ergebnisse darf erwartet werden, dass die Turbinen bei Zugabe geeigneter Inhibitoren zum Brennstoff auch bei hohem Druck und hohen Temperaturen überhaupt keiner Reinigung mehr bedürfen.

Die anfänglichen Versuchsreihen mit Miniaturbrennkammern ergaben mit der Beimischung von Siliziumverbindungen bald günstige Resultate. Sie liessen sich auf Brennkammern von technischem Format anwenden. Die an sich bequem zu handhabenden öllöslichen Aethylsilikate schieden wegen zu hohen Kosten aus. Als besonders wirksam erwiesen sich einige komplexe mineralische Silikate. Im Gegensatz zu den oft erwähnten Erdalkalien vermögen gewisse Silikate die Ablagerungen fördernde Sulfatbildung zu unterbinden, indem sie die Erdalkali- und Alkalisulfate zersetzen und mit den restlichen Oxyden komplexe Silikate von hohem Schmelzpunkt bilden. Weiterhin binden diese Stoffe den grössten Teil des Vanadium-Pentoxyds chemisch, indem sie es in ihr Kristallgitter einbauen. Dadurch erklärt sich auch die wesentliche Abschwächung der durch flüssiges Vanadiumpentoxyd verursachten Korrosionen. Die an sich schon günstige Wirkung solcher Beimischungen kann insbesondere bei höheren Temperaturen durch die spurenweise Zugabe komplexer metallischer Verbindungen erheblich gesteigert werden.

Besondere Probleme stellt die Einführung solcher nicht öllöslicher Brennstoffzusätze in den Gasturbinenprozess. Der günstige Effekt hängt davon ab, dass sie schon in der Flammzone mit einem möglichst grossen Anteil der Oelasche reagieren. Zur Erreichung der erforderlichen Reaktionswahrscheinlichkeit dürfen die Zusätze, die in Pulverform einzuführen sind, nicht etwa in die Brennkammer selbst eingeblasen werden; man muss sie vielmehr im Brennstoff suspendieren.

Wie weitere Untersuchungen ergaben, ist das Verfahren der Beimischung von grosser Bedeutung. Nicht nur können bei unzuweckmässiger Zusetzung Störungen an den Pumpen, Einspritzdüsen usw. auftreten (die Zugaben betragen unter Umständen bis 0,5 % des Brennstoffgewichtes), auch die benötigte Menge des Zusatzstoffes ist vom Zustand der Suspension teilweise abhängig. Es ist leicht einzusehen, dass die Verteilung der Tröpfchengrössen des eingespritzten Brennstoffes (Zulaufdruck, Brennercharakteristik) auf die Partikelverteilung in der Suspension sorgfältig abgestimmt sein muss, um optimale Wirkung zu erreichen. Mit Hilfe mechanischer Rührvorrichtungen und unter Verwendung eines in den La-

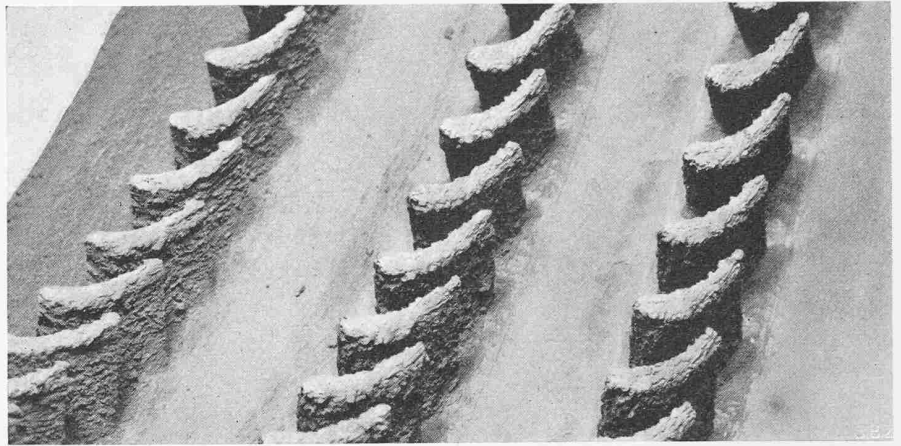


Bild 3. Schaufelträger der Hochdruckturbinen, Stufen 1, 2, 3, nach 50 h Betrieb mit Brennöli ohne Zusatz und $p_{max} = 18 \text{ atü}$, $t_{max} = 630^\circ \text{C}$

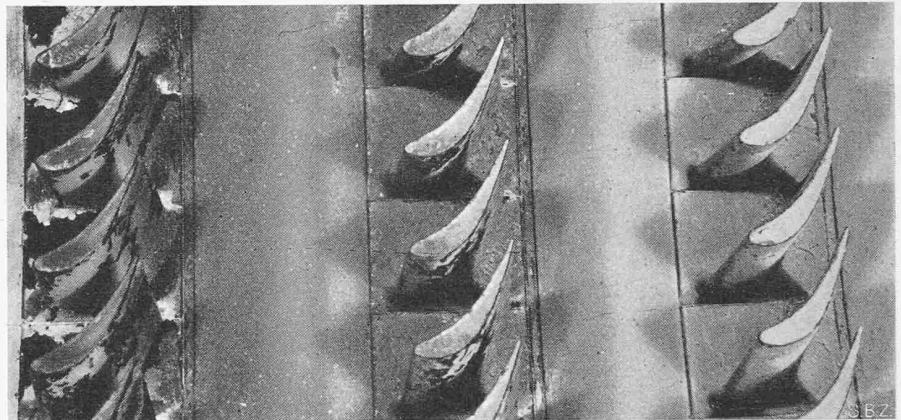
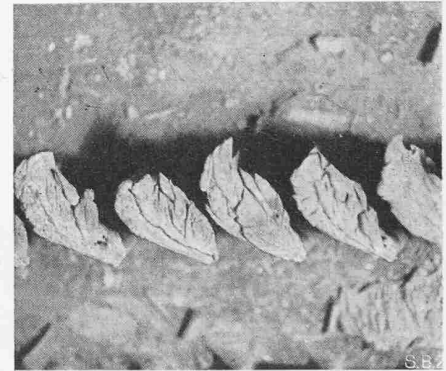
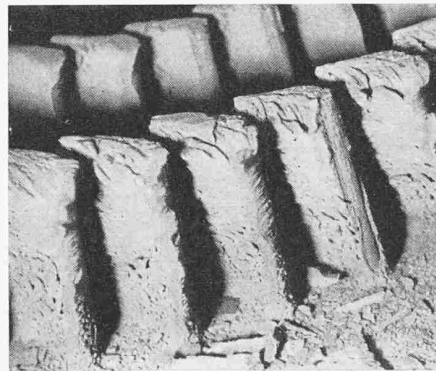


Bild 4. Der selbe Schaufelträger wie Bild 3. Stufen 1, 2 und 3, nach 700 h Betrieb mit Brennöli II + Zusatz und $p_{max} = 25 \text{ atü}$, $t_{max} = 675^\circ \text{C}$



Bilder 5 und 6. Schaufelträger der Nutzturbine, Stufe 1, nach 250 h Betrieb mit Brennöli ohne Zusatz und $p_{max} = 7 \text{ atü}$, $t_{max} = 650^\circ \text{C}$

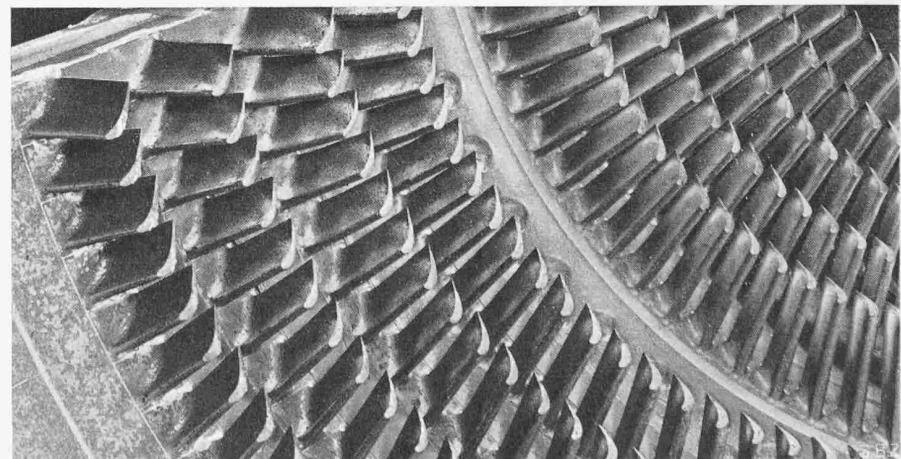


Bild 7. Schaufelträger der Nutzturbine (wie Bild 5) nach 700 h Betrieb mit Brennöli II + Zusatz und $p_{max} = 8 \text{ atü}$, $t_{max} = 675^\circ \text{C}$



Bild 8. Schaufelträger der Hochdruckturbine, Stufen 1, 2 und 3, nach 700 h Betrieb mit Brennöl II + Zusatz und $p_{max} = 25$ atü, $t_{max} = 675^\circ\text{C}$

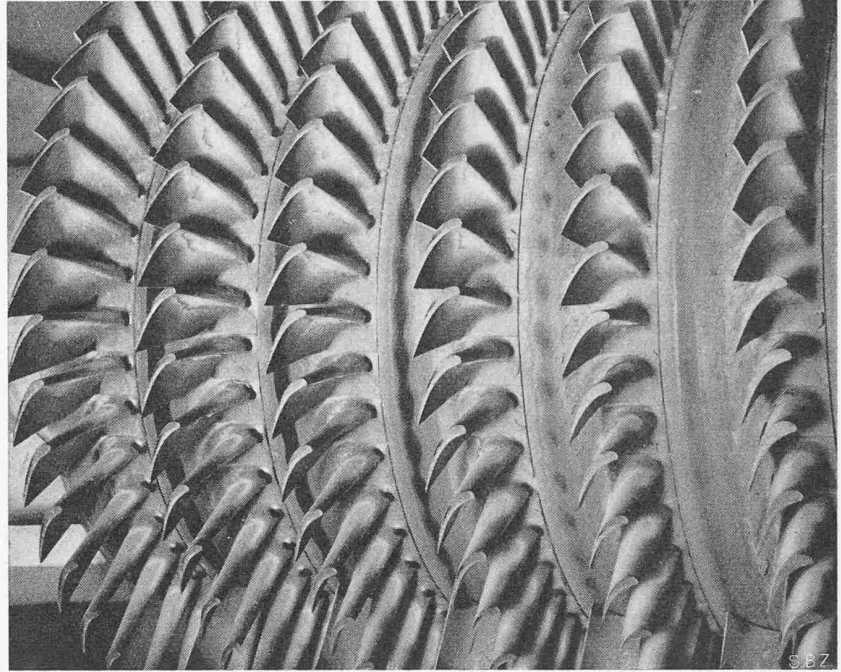


Bild 9. Rotor der Hochdruckturbine nach 700 h Betrieb mit Brennöl II + Zusatz und $p_{max} = 25$ atü, $t_{max} = 675^\circ\text{C}$

boratorien von Gebr. Sulzer entwickelten Emulgators ist dies gelungen. Als weiterer Punkt ist noch zu bemerken, dass auch die Flammentemperatur in der Brennkammer die Reaktion zwischen der Oelasche und der Beimischung beeinflusst.

Zur Bereitung der Brennölzusätze kommen verschiedene Silizium-Verbindungen als Grundstoffe in Frage, z. B. Tone, Kaoline, usw. Die Wahl hat nach speziellen Gesichtspunkten zu erfolgen. Einige darin oft enthaltene Spurenelemente, z. B. Alkalien, Eisen, wirken ungünstig und dürfen nur einen kleinen Prozentsatz ausmachen. In physikalischer Hinsicht ist nicht nur die mittlere Korngrösse, sondern auch die Kornverteilung von Bedeutung. Schon geringe Mengen grobkörniger Substanzen rufen Erosionsschäden an den Turbinen hervor.

Im folgenden wollen wir kurz über unsere Betriebserfahrungen mit Schweröl in der Anlage Weinfelden berichten. Der halboffene, dort angewendete Prozess ermöglicht den Bau von Gasturbinenanlagen mit verhältnismässig kleinen Abmessungen, geringem Gewicht und hohem Wirkungsgrad. Bild 1 zeigt das Schema der halboffenen Anlage von 20 000 kW in Weinfelden.

Der zweistufige Niederdruck-Kompressor 1, bestehend aus zwei Axialverdichtern mit Zwischenkühlung, verdichtet die angesogene Luft auf rd. 5,5 atü. Diese durchströmt gemeinsam mit der aus dem Luftrekupurator 5 des geschlossenen Systems austretenden Luft den Rückkühler 3, wird im Hochdruckverdichter 4, wiederum bestehend aus zwei Axialverdichtern mit Zwischenkühlung, auf rd. 25 atü komprimiert und dann in zwei Ströme aufgeteilt. Der für den geschlossenen Kreislauf abgezwigte Strom gelangt durch den Luftrekupurator 5 in den Lufterhitzer 6a, erhitzt sich dort auf etwa 670°C , tritt dann in die zum Antrieb des Hochdruckverdichters 4 bestimmte Heissluftturbine 7 und entspannt sich dort auf etwa 5,5 atü. Die restliche Wärme gibt er im Luftrekupurator 5 teilweise an die nachströmende Luft ab und vereinigt sich vor dem Rückkühler 3 mit der nachgespiessenen Frischluft. Der andere für den offenen Prozess beim Austritt aus dem Hochdruckverdichter 4 abgezwigte Strom wird im Gasrekupurator 14 vorgewärmt und gelangt in die unmittelbar über dem Lufterhitzer 6a stehende Hauptbrennkammer 6. Die auf über 1000°C erhitzten Rauchgase kühlen sich im Lufterhitzer 6a auf rd. 580°C ab, werden in der zweiten Brennkammer 8 wieder auf 670°C erhitzt und expandieren in der Hochdruckturbine 9. In der nachfolgenden dritten Brennkammer 10 findet eine nochmalige Erwärmung auf 670°C statt. Die Leistungsabgabe erfolgt dann in der mit dem Generator 12 gekuppelten zweiteiligen Nutzturbine 11.

Die Abgase strömen dann mit rd. 0,1 atü zum Gasrekupurator 14 und nachher in den Kamin.

Die Volumina im Niederdruckteil sind bei diesem Prozess viel kleiner, und der maximale Druck ist bedeutend höher als beim offenen Prozess. Im Gegensatz zum geschlossenen Verfahren arbeitet der Lufterhitzer gas- und luftseitig auf dem gleichen Druckniveau von 25 atü, was eine einfachere Konstruktion und die Einhaltung kleinerer Abmessungen ermöglicht. Bild 2 zeigt die Anlage Weinfelden mit noch nicht fertig verkleideten Isolierungen.

In Tabelle 1 finden sich einige charakteristische Daten der verwendeten Brennstoffe. Bild 3 zeigt einen Ausschnitt des Schaufelträgers¹⁾ der Hochdruckturbine nach 50stündigem Betrieb mit Brennöl I bei $t_{max} = 630^\circ\text{C}$ und $p_{max} = 18$ atü. Die Bilder 5 und 6 vermitteln einen Eindruck der Verschmutzung der Nutzturbine nach rd. 250stündigem Betrieb mit Brennöl I bei $t_{max} = 650^\circ\text{C}$ und $p_{max} = 7$ atü. Die Beläge bestehen zur Hauptsache aus Oelasche mit herausgelösten Korrosionsprodukten. Diese Produkte stammen grösstenteils aus dem zwischen der Hauptbrennkammer und der Ladebrennkammer eingeschalteten Lufterhitzer, der mehr unter der intensiven Korrosion durch Vanadiumpentoxyd als unter der Verschmutzung litt.

Ein weiterer Probetrieb mit dem etwas weniger schlechten Brennöl II ergab ähnlich ungünstige Resultate. In beiden Fällen waren die Turbinenschaufeln nach Entfernung der Beläge sehr stark korrodiert und mussten teilweise ausgetauscht oder ersetzt werden. An einen regelmässigen Schwerölbetrieb war vorderhand nicht zu denken, wenigstens nicht mit Vanadium oder Natrium enthaltenden Brennstoffen.

Nachdem die Laboratoriumsversuche ermutigende Resultate ergeben hatten, konnte im Frühling 1953 der erste Probelauf mit Brennstoff II und Zusatz zur Ausführung gelangen. Anfängliche Störungen durch eine noch mangelhafte Art der

¹⁾ Wir wählten absichtlich Bilder der Schaufelträger, da sie wesentlich stärker verschmutzen als die Rotoren.

Tabelle 1. Gehalt der verwendeten Brennöle I und II an aschebildenden Stoffen in Gewichtsprozenten des Brennöls

Brennöl	I	II
Schwefel	1,9	1,9
Asche	0,05	0,045
V ₂ O ₅	0,03	0,018
Na ₂ O	0,005	0,012

Beimischung sowie durch Verstopfung des Lufterhitzers liessen sich im nachfolgenden Betrieb weitgehend vermeiden.

Die Bilder 4 und 8 zeigen die ersten Stufen und Bild 9 den Rotor der Hochdruckturbinen nach etwa 700 Betriebsstunden mit Brennstoff II plus Zusatz bei $t_{\max} = \sim 675^{\circ}\text{C}$ und $p_{\max} \approx 25$ atü; Bild 7 den Schaufelträger der Nutzturbine nach der gleichen Betriebsdauer bei $t_{\max} = 675^{\circ}\text{C}$ und $p_{\max} \approx 8$ atü. In dieser Zeit wurden über 2500 t Brennöl verbrannt. Die Beimischung bestand zum grossen Teil aus Kaolin mit metallischen Zusätzen. Zur Stabilisierung der Suspension diente der schon erwähnte Emulgator.

Die bisherigen Betriebserfahrungen, die sich über mehr als 1200 Stunden Betrieb mit Schweröl erstrecken, lassen folgendes erkennen:

a) Die Korrosion des Lufterhitzers kann trotz sehr hohen Temperaturen (die Temperatur des Bündelbodens am Eintritt beträgt rd. 900°C) wirksam durch Brennstoffzusätze verhindert werden. Die Bildung von pulverigen Belägen in den Rohren ist dagegen kaum zu vermeiden. Wir schliessen daraus, dass ein sechswöchiger Normalbetrieb ohne Reinigung (was auch schon erreicht wurde) möglich sein wird. Die Reinigung ist denkbar einfach und besteht lediglich im einmaligen Durchbürsten, oder in der Anwendung von «Russbläsern».

b) Die Schaufelung der Hochdruckturbinen ist trotz den extremen Betriebsbedingungen ($p_{\max} = 25$ atü, $t_{\max} = 675^{\circ}\text{C}$)

lediglich mit dünnen pulverigen Ablagerungen, vornehmlich auf der konvexen Fläche, behaftet. Solche fanden sich schon in ungefähr gleichem Ausmass nach 50 Betriebsstunden. Infolge der raschen Abkühlung beim Öffnen der Turbinen springen von den heissesten beiden Schaufelreihen hauchdünne Oxydplättchen mit dem daran haftenden Pulver ab. Das erklärt die schwarzen Flecken auf den konvexen Schaufelflächen in Bild 4. Eine Reinigung war bisher nicht nötig und könnte gegebenenfalls durch Ausblasen mit einem Pressluftstrahl erfolgen.

c) Die Nutzturbine ist vollständig sauber. Ein Leistungsabfall infolge einer Turbinenschmutzung ist an keiner Maschine festzustellen.

d) Die Gasrekuperatoren bieten keinerlei Schwierigkeiten, wenn die Temperaturen über dem Taupunkt der Rauchgase liegen.

Von besonderem Interesse sind die durch die Beimischung entstehenden Mehrkosten. Diese betragen vorderhand noch 3 bis 5 % der Brennstoffkosten, dürften sich aber in einiger Zeit auf 1 bis 2 % reduzieren lassen.

Die Untersuchungen in den Laboratorien gehen weiter, und es scheint durchaus möglich, die Wirkung der Brennstoffzusätze durch neue Stoffe oder Kombinationen zu verbessern bzw. das zugesetzte Quantum zu verkleinern.

Adresse des Verfassers: Dr. Peter Sulzer, bei Gebr. Sulzer AG., Winterthur.

Geschäftsräume der Uhren- und Bijouterie-Firma Gübelin Söhne, Luzern und Zürich

Architekten Karl Egender, Zürich, und Hans Gübelin, Luzern

DK 725.211 / Hierzu Tafeln 13/16

Die Räume in Luzern

Die ersten Gedanken zum Umbau der Räumlichkeiten der Firma Gübelin stammten vom Gründer des Unternehmens. Nach seinem Tode wurde die Firma von seinen Söhnen übernommen und weitergeführt; die Ausführung des Umbaus musste vorerst aufgeschoben werden. Ursprünglich hatte man die Absicht gehabt, nur die schon früher der Firma Gübelin gehörenden Räume zu renovieren. Als sich aber Ende 1950 die Nachbarfirma auflöste, entschloss man sich, das ganze Erdgeschoss mit Verkaufsräumen zu belegen und den 1. Stock für die Werkstatt Räume auszubauen. Dieser Umbau fand 1951/52 statt.

Das Erdgeschoss bestand ursprünglich aus drei getrennten Läden. Es galt nun, diese drei zu einem zusammenzufassen, um den Anforderungen des Sommersaisonbetriebes gerecht zu werden. Trotz der Grösse des neuen Raumes war eine wohnliche Atmosphäre zu gewährleisten, besonders während der eher ruhigen Winterzeit. Die totale Innenraumgestaltung zog auch die Erneuerung der Erdgeschossfassade nach sich. Die Hauseigentümer erklärten sich bereit, gleichzeitig die ganze Hausfassade zu renovieren.

Räumliche Gliederung

Hinter der Schaufensterfront liegt der grosse Verkaufsraum, dem sich zwei kleinere Räume anschliessen: der Empfangsraum und der sog. Diamond-room. Rückwärts im Erdgeschoss liegen Büroräume. Im Zwischengeschoss sind die Direktionsbüros, das wissenschaftliche Laboratorium für Steinuntersuchungen und die Büroräume für Export und Korrespondenz. Der 1. Stock ist mit der Bijouterie-, der Uhrenfabrikations- und der Reparaturabteilung sowie mit weiteren Räumen belegt.

Konstruktion

Der Ausbruch von zwei Haupttragwänden im Erdgeschoss machte umfangreiche Ingenieurarbeiten notwendig (ausgeführt von Ing. C. Erni, Luzern). Die Wände wurden durch Stockwerkrahmen in Stahl mit untern Verteilsschwellen ersetzt. In gleicher Art sind die fünf Schaufensteröffnungen ausgeführt worden, da auch dort z. T. alte Fassadenstützen entfernt werden mussten. Die ganze Stahlkonstruktion wurde zusätzlich ausbetoniert.

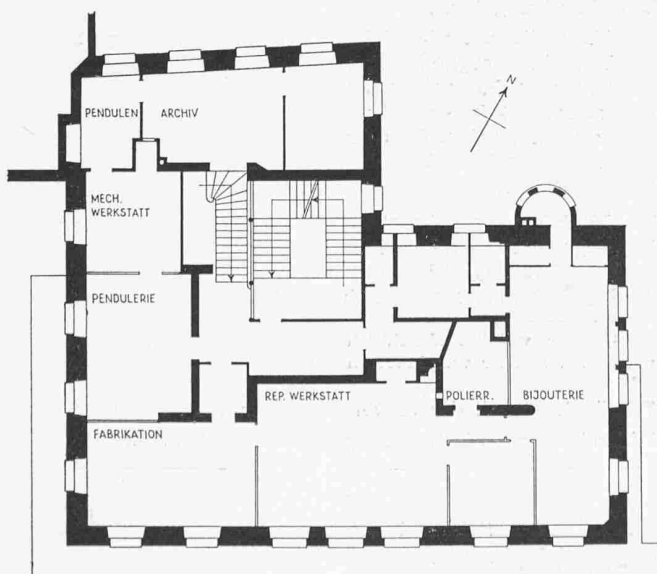
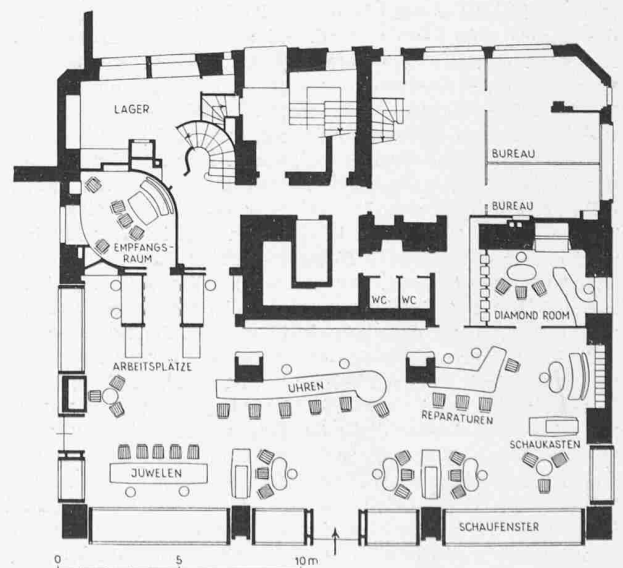


Bild 1. Werkstatt Räume im ersten Stock



Masstab 1:300

Bild 2. Erdgeschoss