

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 80 (1962)
Heft: 19

Artikel: Lineare Ungleichungen in der Baustatistik
Autor: Prager, William
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-66151>

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: 05.07.2025

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

Lineare Ungleichungen in der Baustatik

DK 624.04:539.374

Von Prof. William Prager, Brown University, Providence, R. I., USA ¹⁾

I. Einleitung

Lineare Ansätze, aus denen Superpositionsprinzipien folgen, sind die Regel in der mathematischen Analyse technischer Probleme. So führt zum Beispiel das Ohmsche Gesetz auf ein lineares Gleichungssystem für die Verteilung der Stromstärke in einem elektrischen Leitungsnetz. In Anbetracht der grossen Erfolge linearer Ansätze in der mathematischen Physik und im Ingenieurwesen ist es ganz natürlich, dass man sich wiederum solcher Ansätze bediente, als man volkswirtschaftliche Probleme mathematisch zu erfassen begann. Es zeigte sich jedoch bald, dass dieses Vorgehen nicht von Erfolg begleitet war, und es ist das Verdienst Johann von Neumanns, auf die wichtige Rolle hingewiesen zu haben, welche Ungleichungen in diesem Gebiete spielen können. In vielen Fällen kann man diese Ungleichungen linearisieren, und das typische Problem erfordert dann die Ermittlung des Maximums oder Minimums einer linearen Funktion, deren Veränderliche linearen Ungleichungen unterworfen sind.

Viele Aufgaben der Planung in Industrie und Volkswirtschaft lassen sich auf dieses Grundproblem der sogenannten *linearen Optimierung* zurückführen. Obwohl allgemeine Methoden zur Lösung dieses Problems erst vor kurzem im Rahmen der Planungsforschung entwickelt wurden, findet sich das erste Beispiel einer linearen Optimierung in einer Arbeit, die Fourier im Jahre 1823 in der *Histoire de l'Académie* veröffentlicht hat (Werke, Bd. II, S. 321). In dieser Arbeit stellt sich Fourier die folgende Aufgabe. Eine *starre* quadratische Platte ruht in horizontaler Lage auf vier Stützen an ihren Ecken. Keine der Stützen kann eine Druckkraft aufnehmen, die grösser als die Krafteinheit ist. Man bestimme die grösste vertikale Last, die an einem gegebenen Punkt der Platte wirken kann, ohne zum Versagen der Konstruktion zu führen. Fourier bemerkt, dass die Prinzipien der Statik unmittelbar drei Gleichungen für die vier Stützkräfte liefern, zu denen

man für jede Stütze noch zwei Ungleichungen fügen muss, welche ausdrücken, dass die Druckkraft in der Stütze positiv und kleiner als die Krafteinheit sein muss. Ohne auf mathematische Einzelheiten einzugehen, gibt Fourier die Lösung der Aufgabe und stellt fest, dass sie nicht durch einen analytischen Ausdruck dargestellt ist. In der Tat, bei gegebener Lastintensität ist der Angriffspunkt der Last auf das Innere eines gewissen Polygons beschränkt, wenn die Konstruktion nicht versagen soll. Bild 1 zeigt einige dieser Polygone und die zugehörigen Lastintensitäten.

Fouriers Arbeit erschien einige Jahre vor Cauchys grundlegenden Untersuchungen zur Elastizitätstheorie. Es ist daher kaum verwunderlich, dass Fourier ein statisch unbestimmtes Problem behandelt, ohne die Spannungs-Dehnungsbeziehungen für die Stützen zu verwenden. Die Erd-drucktheorie, die zu Fouriers Zeit schon weit entwickelt war, geht in ähnlicher Weise vor, indem sie zu den Gleichgewichtsbedingungen eine Ungleichung hinzufügt, der zu Folge die in einem beliebigen Flächenelement übertragene Schubspannung nicht einen bestimmten Prozentsatz der Normalspannung in diesem Element überschreiten kann.

Da jedoch Fouriers Analyse zu einer eindeutigen Lösung führt, setzt sie ein bestimmtes mechanisches Verhalten der Stützen voraus. In der Tat, damit Fouriers Analyse berechtigt ist, muss die Beziehung zwischen der Verkürzung u_i der Stütze und der zugehörigen Druckkraft R_i durch das Diagramm Bild 2 dargestellt werden. Der Zweig OAB dieses Diagramms stellt das elastische Verhalten mit nachfolgendem plastischem Fließen der Stütze dar, und der Zweig OC entspricht dem Abheben der Platte von der Stütze. Wenn man will, kann man diesen Zweig als plastisches Fließen unter verschwindender Zugkraft deuten. Fouriers Problem kann daher als ein Problem der plastischen Traglastbestimmung angesehen werden.

Um grundlegende Lehrsätze des plastischen Traglastverfahrens zu erläutern, wollen wir Fouriers Problem abändern, indem wir das Diagramm Bild 2 durch dasjenige von Bild 3 ersetzen: Die Platte kann sich nicht mehr von den Stützen abheben; die Stützen verhalten sich elastisch-idealplastisch unter Druck, aber unbegrenzt elastisch unter Zug. Die Möglichkeit, dass die vier Stützen verschiedene Druckfliessgrenzen besitzen, soll nicht ausgeschlossen werden.

Wir wählen einen festen Angriffspunkt für die Last und lassen ihre Intensität von null an stetig zunehmen. Unter genügend kleiner Last verhalten sich alle Stützen elastisch, und zur Berechnung der vier Stützkräfte stehen uns drei Gleichgewichtsbedingungen und eine Verträglichkeitsbedingung zur Verfügung. Die letztere sagt aus, dass, infolge der

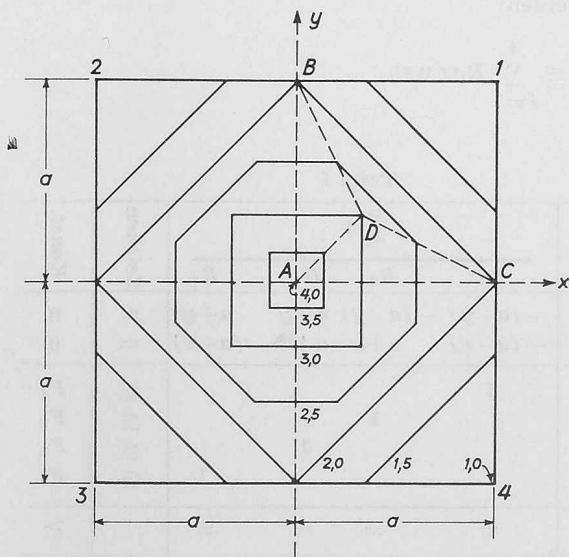


Bild 1

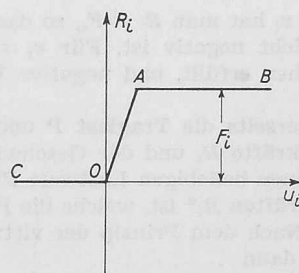


Bild 2

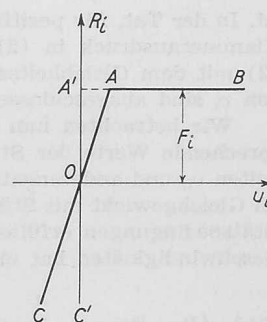


Bild 3

vorausgesetzten Starrheit der Platte, die Längenänderungen von drei Stützen die Längenänderung der vierten Stütze eindeutig bestimmen. Das *völlig elastische Verhalten*, während dessen die Stützkraft proportional zur Last wachsen, endet, wenn eine der Stützkraft die zugehörige Fließgrenze erreicht. Da diese Stützkraft nicht weiter wachsen kann, verteilt sich jeder weitere Zuwachs der Last in statisch bestimmter Weise auf die drei anderen Stützen. Solange diese Stützen sich elastisch verhalten, hat die plastische Verkürzung der vierten Stütze elastische Grössenordnung. Dieses *elastisch-plastische Verhalten mit beschränkter plastischer Verformung* endet, wenn eine weitere Stütze ihre Fließgrenze erreicht. Infolge des Fließens der beiden plastischen Stützen unter konstanter Last beginnt sich die Platte um die Gerade zu drehen, welche die Stützpunkte der noch elastischen Stützen verbindet. Die zugehörige Last stellt die *Tragfähigkeit* der Konstruktion für den gewählten Lastangriffspunkt dar.

Wir bemerken, dass im elastischen Gebiete die Verteilung der Last auf die vier Stützen sich nicht ändert, wenn man den Elastizitätsmodul einer jeden Stütze mit dem selben Faktor multipliziert. Indem wir uns diesen Faktor sehr gross gewählt denken, können wir die elastisch-plastischen Stützen durch starr-plastische Stützen ersetzen, deren mechanisches Verhalten durch das Diagramm *C'A'B* in Bild 3 dargestellt wird. Um dieses Diagramm mathematisch zu beschreiben, benützen wir die Druckkraft R_i an der Stütze i und die Geschwindigkeit v_i , mit der sich diese Stütze verkürzt.

Einer beliebigen positiven Geschwindigkeit v_i entspricht die Druckflusskraft F_i , während einer beliebigen Stützkraft unterhalb der Fließgrenze F_i die Geschwindigkeit $v_i = 0$ entspricht. Die Leistung der Stützkraft ist daher

$$(1) \quad L = F_i v_i \text{ für } v_i \geq 0$$

Negative Geschwindigkeiten v_i sind nicht zulässig.

Solange die Last unterhalb der Traglast P bleibt, verhält sich die Konstruktion starr. Plastisches Fließen kann nur unter der Einwirkung der Traglast P auftreten. Während dieses Fließens seien v und v_i die Vertikalgeschwindigkeiten des Lastangriffspunkts und der vier Ecken der Platte, und R_i die zugehörigen Stützkraften. Diese Grössen sind den folgenden Bedingungen unterworfen:

1. Die Gleichgewichtsbedingungen für die Last P und die Stützkraften R_i (drei Gleichungen);
2. die Verträglichkeitsbedingungen für die Geschwindigkeiten v und v_i (zwei Gleichungen);
3. die Plastizitätsbedingungen, welche Stützkraften R_i oberhalb der zugehörigen Fließgrenze F_i ausschliessen (vier Ungleichungen); und
4. die Fließregeln, welche fordern, dass die Geschwindigkeit v_i nichtnegativ ist oder verschwindet, je nach dem die Stützkraft R_i ihren Grösstwert F_i annimmt oder nicht.

Aus der Fließregel ergibt sich leicht eine wichtige Beziehung. Für einen zulässigen, das heisst nichtnegativen Wert von v_i , soll R_i den tatsächlichen Wert der Stützkraft bedeuten und R_i^* einen fiktiven Wert dieser Stützkraft, der die Plastizitätsbedingung $R_i^* \leq F_i$ erfüllt. Man bestätigt ohne Schwierigkeit, dass

$$(2) \quad (R_i - R_i^*) v_i \geq 0$$

ist. In der Tat, für positives v_i hat man $R_i = F_i$, so dass der Klammerausdruck in (2) nicht negativ ist. Für $v_i = 0$ ist (2) mit dem Gleichheitszeichen erfüllt, und negative Werte von v_i sind ausgeschlossen.

Wir betrachten nun einerseits die Traglast P und entsprechende Werte der Stützkraften R_i und der Geschwindigkeiten v_i , und andererseits einen beliebigen Lastwert P^* , der im Gleichgewicht mit Stützkraften R_i^* ist, welche die Plastizitätsbedingungen erfüllen. Nach dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten hat man dann

$$(3) \quad (P - P^*) v = \sum_{i=1}^4 (R_i - R_i^*) v_i$$

Da die Geschwindigkeit v nichtnegativen Werten der Geschwindigkeiten v_i entspricht, ist sie selbst nichtnegativ, und Einsetzen der Ungleichung (2) in die Beziehung (3) ergibt

$$(4) \quad P \geq P^*$$

Die Traglast ist somit die grösste Last, die mit Stützkraften ins Gleichgewicht gesetzt werden kann, welche die Plastizitätsbedingungen erfüllen.

Dieses statische Prinzip führt unmittelbar auf ein Problem der linearen Optimierung. In der Tat, durch den gewählten Lastangriffspunkt ziehen wir Parallelen zur x - und y -Achse (Bild 1) und verlangen, dass die Summe der Momente der Stützkraften mit Bezug auf eine jede dieser Axen verschwindet. Dies gibt zwei lineare Gleichungen für die Stützkraften R_i , denen wir noch vier Ungleichungen hinzufügen müssen, welche die Plastizitätsbedingungen für die Stützkraften ausdrücken. Um die Traglast P zu finden, müssen wir die Unbekannten R_1, R_2, R_3, R_4 so bestimmen, dass diese Gleichgewichts- und Plastizitätsbedingungen erfüllt sind, während die lineare Form

$$(5) \quad P = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

ihren Grösstwert annimmt. Mit den Bezeichnungen von Bild 1 ist diese lineare Optimierungsaufgabe durch die Tafel I dargestellt.

Die Einträge in der ersten Kolonne dieser Tafel werden später erklärt werden. Die Einträge in den nächsten sechs Kolonnen sind die Koeffizienten von R_1 bis R_4 , die Gleichheits- oder Ungleichheitszeichen, und die rechten Seiten unserer Beziehungen. Die ersten zwei Zeilen der Tafel I sind die Gleichgewichtsbedingungen und die folgenden vier Zeilen die Plastizitätsbedingungen. Die letzte Zeile schliesslich sagt aus, dass die Traglast P dem Grösstwert der Summe der Stützkraften R_1 bis R_4 entspricht. Da die beiden Gleichgewichtsbedingungen die Gesamtheit der Stützkraften auf eine zweiparametrische Schar reduzieren, ist zu erwarten, dass in der Lösung unseres Problems das Gleichheitszeichen in wenigstens zwei der Plastizitätsbedingungen gilt.

Eine andere lineare Optimierungsaufgabe, deren Lösung die Traglast liefert, wird wie folgt erhalten. Wir betrachten einerseits die Traglast P und entsprechende Werte der Stützkraften R_i und der Geschwindigkeiten v und v_i , und andererseits nichtnegative Geschwindigkeiten v^{**} und v_i^{**} , welche die Verträglichkeitsbedingungen erfüllen, und Stützkraften R_i^{**} , die zusammen mit den Geschwindigkeiten v_i^{**} die Fließregeln erfüllen. Nach dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten hat man

$$(6) \quad P v^{**} = \sum_{i=1}^4 R_i v_i^{**}$$

In Anbetracht der Beziehung (2) kann (6) wie folgt geschrieben werden:

$$(7) \quad P v^{**} \leq \sum_{i=1}^4 R_i^{**} v_i^{**}$$

Tafel I

Veränderliche	$\begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} 0$				Zeichen	Konst.
	R_1	R_2	R_3	R_4		
$\begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} 0, \begin{cases} \omega_x \\ \omega_y \end{cases}$	$-(a-y)$	$-(a-y)$	$a+y$	$a+y$	$=$	0
	$-(a-x)$	$a+x$	$a+x$	$-(a-x)$	$=$	0
$\begin{matrix} \geq 0 \\ \begin{cases} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{cases} \end{matrix}$	1	1	1	1	$\leq$	F_1 F_2 F_3 F_4
Zeichen	$=$	$=$	$=$	$=$		$\geq$
Konst.	1	1	1	1	$\leq$	P

Da $R_i^{**}v_i^{**}$ die Leistung der Stützkraft R_i^{**} an der Geschwindigkeit v_i^{**} ihres Angriffspunktes ist, folgt aus (1) und (7), dass

$$(8) \quad P v^{**} \leq \sum_{i=1}^4 F_i v_i^{**}$$

ist.

Wir bezeichnen nun mit P^{**} die fiktive Traglast, welche durch Gleichsetzen der äusseren Leistung $P^{**}v^{**}$ und der inneren Leistung

$$\sum_{i=1}^4 F_i v_i^{**}$$

erhalten wird. Da die Geschwindigkeit v^{**} als nichtnegativ vorausgesetzt wurde, zeigt die Ungleichung (8), dass $P \leq P^{**}$ ist.

Die tatsächliche Traglast ist daher die kleinste der betrachteten fiktiven Traglasten.

Wir wenden nun dieses kinematische Prinzip auf die Bestimmung der Traglast an. Ein System von Geschwindigkeiten $v^{**}, v_1^{**}, v_2^{**}, v_3^{**}, v_4^{**}$, das die Verträglichkeitsbedingungen erfüllt, kann durch Superposition der folgenden drei Bewegungen erhalten werden: Eine vertikale Translation der Platte und Drehungen um Parallelen zur x - und y -Axe durch den Lastangriffspunkt. Wir bezeichnen die Winkelgeschwindigkeiten dieser Drehungen mit ω_x und ω_y , und kommen überein, dass eine positive Winkelgeschwindigkeit der Ecke 1 (Bild 1) eine nach unten gerichtete Geschwindigkeit erteilen soll. Da unsere Beziehungen homogen in den Geschwindigkeiten sein werden, hat der Geschwindigkeitsmassstab keinerlei Bedeutung, und wir können die Geschwindigkeit der vertikalen Translation der Platte als Geschwindigkeitseinheit wählen. Wir erhalten somit die Gleichung

$$(9) \quad v_1 = 1 + \omega_x(a - y) + \omega_y(a - x)$$

und ähnliche Gleichungen für die Geschwindigkeiten der anderen Ecken. Wir bemerken, dass wir sowohl diese Gleichungen als auch die lineare Form, deren Minimum die Traglast ist, aus den Kolonnen der Tafel I erhalten können, wobei die Elemente einer Kolonne als Koeffizienten der am linken Rande aufgeführten Grössen gedeutet werden müssen.

Die beiden linearen Optimierungsaufgaben, die durch die Tafel I dargestellt sind, werden als einander dual zugeordnet bezeichnet. Die folgenden Eigenschaften der hier betrachteten Aufgaben gelten ganz allgemein für duale lineare Optimierungen. Den Ungleichungen einer Aufgabe entsprechen nichtnegative Veränderliche der dualen Aufgabe, während die den Gleichungen einer Aufgabe entsprechenden Veränderliche der dualen Aufgabe keinerlei Vorzeichenbeschränkungen unterliegen. Wenn eine Ungleichung einer Aufgabe als Ungleichung im engeren Sinn erfüllt ist, so verschwindet die entsprechende Veränderliche der dualen Aufgabe.

Tafel II

Veränderliche	$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} 0$			$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} 0$				Zeichen	Konst.
	v	ω_x	ω_y	v_1	v_2	v_3	v_4		
$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} 0$	R_1	1	$a - y$	$a - x$	-1			=	0
	R_2	1	$a - y$	$-(a + x)$	-1			=	0
	R_3	1	$-(a + y)$	$-(a + x)$		-1		=	0
	R_4	1	$-(a + y)$	$a - x$			-1	=	0
$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} 0$	F_1				1			$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$	l_1
	F_2					1		$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$	l_2
	F_3						1	$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$	l_3
	F_4							$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$	l_4
Zeichen	=	=	=	$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$	$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$	$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$	$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$		$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$
Konst.	P	0	0	0	0	0	0	$\begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix}$	C

Im bisher betrachteten Problem waren die Flie遝sgrenzen der vier Stützen gegeben, und der Grenzwert der Last, die an einem vorgegebenen Angriffspunkt wirken kann, war gesucht. Von dieser Aufgabe der plastischen Analyse wollen wir uns nun einer Aufgabe der plastischen Bemessung zuwenden. Um ein nicht völlig triviales Problem zu erhalten, setzen wir voraus, dass die vier Stützen verschiedene Längen l_1, l_2, l_3, l_4 besitzen können. Wir nehmen an, dass der Preis einer Stütze mit der Länge l_i und der Flie遝sgrenze F_i dem Produkt $l_i F_i$ proportional ist. Bei vorgeschriebener Lastintensität und gegebenem Angriffspunkt sollen die vier Stützen so bemessen werden, dass ihr Gesamtpreis möglichst klein ausfällt.

Die Kolonnen der Tafel II geben die Beziehungen, welche die Stützkraften und die Flie遝sgrenzen erfüllen müssen. Die ersten drei Kolonnen entsprechen den Gleichgewichtsbedingungen und die darauf folgenden vier den Plastizitätsbedingungen. Die letzte Kolonne schliesslich gibt die lineare Form C , welche dem Gesamtpreis C proportional ist, und die man zu einem Minimum machen will. Wir haben gesehen, dass für gegebene Flie遝sgrenzen die Traglast die grösste aller Lasten ist, die mit Stützkraften ins Gleichgewicht gesetzt werden kann, welche die Plastizitätsbedingungen erfüllen. Eine Last, die mit solchen Stützkraften im Gleichgewicht steht, kann daher die Traglast nicht überschreiten. Ein jedes System von Stützkraften und Flie遝sgrenzen, welches die durch die ersten sieben Kolonnen der Tafel II gegebenen Beziehungen erfüllt, stellt daher eine zulässige Bemessung dar. Die letzte Kolonne der Tafel II verlangt, dass man unter allen diesen Bemessungen die mit dem kleinsten Preis sucht.

Die Tafel II wurde kolonnenweise geschrieben, damit das Ungleichheitszeichen über der rechten unteren Ecke den selben Sinn hat wie in der Tafel I.

Aus der Tafel II kann man das duale Problem wie folgt ablesen: Man finde nichtnegative Geschwindigkeiten v und v_1 bis v_4 , welche den Verträglichkeitsbedingungen und den Ungleichungen

$$(10) \quad v_i = l_i \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

genügen und das Produkt Pv und somit v möglichst gross machen. Da die Geschwindigkeiten v_i nur der einzigen Verträglichkeitsbedingung

$$(11) \quad v_1 + v_3 - v_2 - v_4 = 0$$

unterliegen, kann man diese Geschwindigkeiten so wählen, dass das Gleichheitszeichen in mindestens drei der Ungleichungen (10) gilt. Wenn zum Beispiel die Stützen 1, 2 und 3 die gleiche Länge L haben, während die vierte Stütze eine grössere Länge $L + l$ besitzt, so sind solche Geschwindigkeitssysteme durch

$$1 \quad v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = L$$

oder

$$2 \quad v_1 = L, v_2 = L - l, v_3 = L, v_4 = L + l$$

gegeben. Im ersten Falle hat man $v_4 < l_4$ und somit $F_4 = 0$. Im zweiten Falle ist $v_2 < l_2$ und daher $F_2 = 0$. In jedem Fall wird also eine der Stützen fortgelassen, und die Last verteilt sich in statisch bestimmter Weise auf die drei verbleibenden Stützen, wobei die Wirkungslinie der Last im Inneren oder auf der Oberfläche des dreieckigen Prismas liegen muss, das die Axen der Stützen zu Kanten hat. Die optimale Bemessung entspricht daher einer statisch bestimmten Konstruktion.

Aus dem Obigen folgt, dass der Mindestpreis dem Ausdruck

$$(12) \quad C = F_1 l_1 + F_2 l_2 + F_3 l_3 + F_4 l_4 \\ = F_1 v_1 + F_2 v_2 + F_3 v_3 + F_4 v_4$$

proportional ist, weil nämlich $v_i = l_i$ sein muss, wenn F_i nicht verschwindet. Für die Konstruktion optimaler Bemessung existiert also ein System von verträglichen Geschwindigkeiten, für welches die Dissipationsleistung je Einheitspreis eines Bauelements für alle Elemente den gleichen Wert hat. Man

kann dieses Ergebnis als das *Prinzip der gleichförmigen Ausnutzung des Materials* bezeichnen.

Bei der Anwendung unserer Ergebnisse auf die plastische Bemessung von Balken oder Rahmen gebrauchen wir ähnliche Vereinfachungen wie bei der Behandlung des Fourierschen Problems. Wir vernachlässigen die elastischen Formänderungen und setzen voraus, dass sich die plastischen Formänderungen unter konstanter Spannung vollziehen. Ein Balkenelement bleibt daher starr oder wirkt als *plastisches Gelenk*, je nachdem der Absolutwert des Biegemoments unterhalb eines kritischen Wertes, dem sogenannten *Fliessmoment*, bleibt oder ihm gleichkommt.

Als Beispiel wollen wir die zweiparametrische Bemessung des Rahmens in Bild 4 behandeln. Wir setzen voraus, dass das Fliessmoment des Balkens den konstanten Wert F_2 hat. Wir setzen weiter voraus, dass der Preis je Längeneinheit eines Balkens mit genügender Genauigkeit durch

$$(13) \quad c = \alpha + \beta F$$

gegeben ist, wo F das Fliessmoment ist und α und β Konstanten sind, welche die zur Verfügung stehenden Balkenprofile charakterisieren. Infolgedessen ist $\alpha h + \beta h (F_1 + F_2)/2$ der Preis einer Säule und $2 \alpha l + 2 \beta l F_2$ der Preis des Balkens. Da α und β Festwerte sind, entspricht die optimale Bemessung dem Minimum der linearen Form

$$(14) \quad C = h F_1 + (h + 2l) F_2$$

die als der *veränderliche Anteil des Preises* bezeichnet werden soll.

Je nach seiner Bemessung könnte der betrachtete Rahmen gemäss eines der in Bild 5 angedeuteten Fliessmechanismen versagen. Nach unserem kinematischen Prinzip muss man die Fliessmomente so wählen, dass für jeden dieser Fliessmechanismen die Dissipationsleistung in den plastischen Gelenken der Leistung der gegebenen Last gleichkommt oder sie übertrifft. Man erhält so die durch die Kolonnen der Tafel III dargestellte lineare Optimierungsaufgabe.

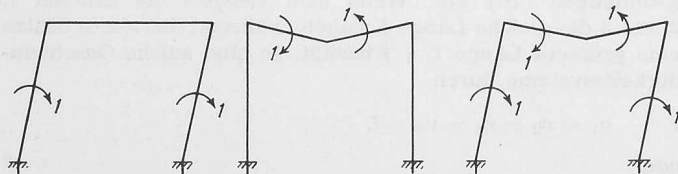


Bild 5

Wir wollen diese Aufgabe lösen, ohne spezielle Werte für die nichtnegativen Grössen h , l , H und P vorzusetzen. Da die durch die ersten drei Kolonnen der Tafel III dargestellten Beziehungen nur zwei Unbekannte enthalten, wird mindestens eine der drei Beziehungen als Ungleichung im engeren Sinn erfüllt sein. Wir nehmen zunächst an, dass dies die erste dieser Beziehungen ist. Indem wir das Gleichheits-

Tafel III

Veränderliche	≥ 0			Zeichen	Konstante
	c_1	c_2	c_3		
$\geq 0 \begin{cases} F_1 \\ F_2 \end{cases}$	2	0	2	$\geq$	h
	2	4	4	$\geq$	$h + 2l$
Zeichen	$\geq$	$\geq$	$\geq$		$\geq$
Konstante	$H \cdot h$	$P \cdot l$	$H \cdot h + P \cdot l$	$\leq$	C

zeichen in den beiden anderen Beziehungen gebrauchen, erhalten wir die Fliessmomente

$$(15) \quad F_1 = Hh/2, \quad F_2 = Pl/4$$

welche die erste Beziehung für alle Werte von H und P erfüllen. Um den Gültigkeitsbereich der Bemessung (15) zu bestimmen, betrachten wir das duale Problem, das durch die Zeilen der Tabelle III angegeben ist. Da die erste Beziehung des ursprünglichen Problems als Ungleichung im engeren Sinn erfüllt ist, muss die entsprechende Veränderliche c_1 des dualen Problems verschwinden. Da weiterhin die Bemessung (15) positive Werte für F_1 und F_2 liefert, muss das Gleichheitszeichen in den entsprechenden Beziehungen des dualen Problems gelten. Man erhält so

$$(16) \quad c_2 = (2l - h)/4, \quad c_3 = h/2$$

Da diese Veränderlichen nichtnegativ sein müssen, ist die Bemessung (15) nur möglich, wenn

$$(17) \quad l/h \geq 1/2$$

ist.

Wir nehmen dann an, dass die zweite Beziehung des ursprünglichen Problems als Ungleichung im engeren Sinn erfüllt ist. Gebrauch des Gleichheitszeichens in den beiden anderen Beziehungen liefert

$$(18) \quad F_1 = (Hh - Pl)/2, \quad F_2 = Pl/2$$

Da F_1 nicht negativ sein kann, ist diese Bemessung nur möglich, wenn

$$(19) \quad Pl/Hh \leq 1$$

ist. Mit $c_2 = 0$ liefert das duale Problem die Werte

$$(20) \quad c_1 = (h - 2l)/2, \quad c_3 = l$$

die nichtnegativ sind für

$$(21) \quad l/h \leq 1/2$$

Die Bemessung (18) ist somit den Bedingungen (19) und (21) unterworfen.

Wenn man die ersten beiden Beziehungen des ursprünglichen Problems als Gleichungen schreibt, findet man, dass ihre Lösung die dritte Beziehung nicht erfüllt. Wir nehmen daher an, dass die beiden ersten Beziehungen des ursprünglichen Problems als Ungleichungen im engeren Sinn erfüllt sind, so dass die entsprechenden Veränderlichen c_1 und c_2 des dualen Problems verschwinden. Die zwei Beziehungen des dualen Problems können dann nicht beide Gleichungen sein. Wenn das Gleichheitszeichen in der zweiten gilt, ist die erste eine Ungleichung im engeren Sinn für

$$(22) \quad l/h < 1/2$$

und die entsprechende Veränderliche des ursprünglichen Problems verschwindet. Da die dritte Beziehung dieses Problems als Gleichung vorausgesetzt wurde, hat man

$$(23) \quad F_1 = 0, \quad F_2 = (Pl + Hh)/4$$

Die beiden ersten Beziehungen des ursprünglichen Problems sind dann Ungleichungen im engeren Sinn, wenn

$$(24) \quad Pl/Hh > 1$$

ist. Die Bemessung (23) ist somit den Bedingungen (22) und (24) unterworfen. Die drei betrachteten Bemessungen und ihre Gültigkeitsbereiche sind in Bild 6 dargestellt.

Wir bemerken noch, dass die Veränderlichen c_1 , c_2 und c_3 des dualen Problems nichtnegative Koeffizienten einer linearen Kombination der drei in Bild 4 dargestellten Mecha-

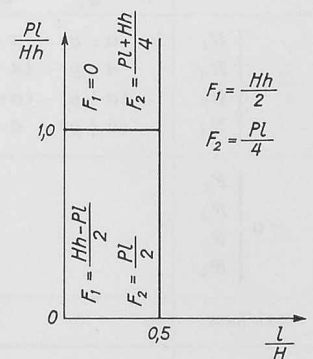


Bild 6

nismen, sind, welche den durch das Prinzip der gleichförmigen Ausnützung des Materials geforderten Mechanismus liefert. Dieses Prinzip gilt jedoch nur, solange man es mit einem einzigen Lastsystem zu tun hat.

Um dies zu beweisen, betrachten wir einen Balken der Länge l , der am einen Ende eingespannt und am anderen gelenkig gelagert ist und durch eine Last der Intensität P beansprucht wird, die entweder in der Mitte der Spannweite oder im Abstand $l/4$ von einem oder dem anderen Ende wirkt. Wir untersuchen die vierparametrische Bemessung, welche durch die Fliessmomente F_1 bis F_4 in den Viertelpunkten der Spannweite bestimmt ist (siehe Bild 7), wobei das Fliessmoment sich in linearer Weise vom einen zum nächsten dieser Punkte verändert und am gelenkig gestützten Ende verschwindet. Bild 7 zeigt sechs Fliesmechanismen, deren jeder zwei plastische Gelenke aufweist. Drei dieser Mechanismen entsprechen der Laststellung 1, zwei der Stellung 2, und einer der Stellung 3. Für einen jeden dieser Mechanismen muss die Dissipationsleistung in den plastischen Gelenken der Leistung der Last gleich sein oder diese überschreiten. Man erhält so die lineare Optimierungsaufgabe, welche durch die Kolonnen der Tafel IV dargestellt ist.

Die für diesen Vortrag angesetzte Zeit schliesst eine detaillierte Beschreibung dieser und der zu ihr dualen Aufgabe aus. Man findet

$$(25) \quad F_1 = \frac{5}{32} Pl, \quad F_2 = \frac{7}{48} Pl, \quad F_3 = \frac{1}{32} Pl, \quad F_4 = \frac{5}{24} Pl$$

$$(26) \quad c_1 = 0, \quad c_2 = l/6, \quad c_3 = 0, \quad c_4 = l/12, \quad c_5 = 18, \quad c_6 = l/16$$

Bild 8 zeigt den Verlauf des Fliessmoments für die optimale Bemessung.

Wir bemerken, dass die relative Winkelgeschwindigkeit am Gelenk 3 für den zweiten und vierten Fliesmechanismus

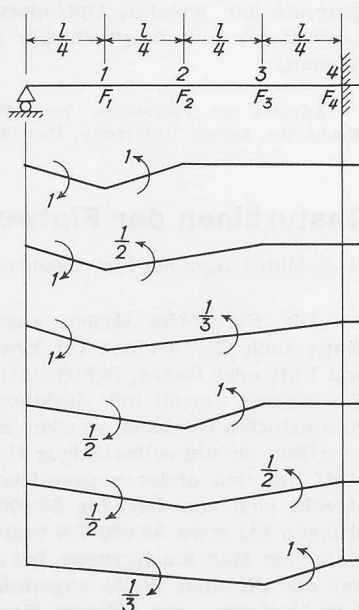


Bild 7

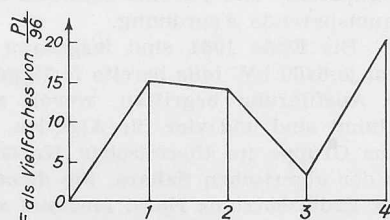


Bild 8

Tafel IV

Veränderliche	≥ 0						Zeichen	Konst.
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6		
≥ 0	F_1	2	$3/2$	$4/3$			$\leq$	$l/4$
	F_2	1		$3/2$	1		$\leq$	$l/4$
	F_3		$1/2$	1		$4/3$	$\leq$	$l/4$
	F_4			$1/3$	$1/2$	1	$\leq$	$l/8$
Zeichen	$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$	$\geq$		$\geq$
Konstante	$P \cdot l/4 \cdot P \cdot l/4 \cdot P \cdot l/4 \cdot P \cdot l/4 \cdot P \cdot l/4 \cdot P \cdot l/4$						$\leq$	C

von Bild 6 negativ ist, aber positiv für den sechsten. Infolgedessen kann die dritte Beziehung des dualen Problems, nämlich die Gleichung

$$(27) \quad \frac{1}{2}c_2 + c_4 + \frac{4}{3}c_6 = l/4$$

nicht als die Forderung eines Fliesmechanismus interpretiert werden, für den die relative Winkelgeschwindigkeit am Gelenk 3 den Wert $l/4$ hat. Das Prinzip der gleichförmigen Ausnützung des Materials verliert daher seine Gültigkeit, wenn man es mit mehrfachen Lastsystemen zu tun hat.

Indem man die Anzahl der betrachteten Laststellungen vergrössert, kann man die numerischen Methoden der linearen Optimierung benutzen, um sich der Bemessung für bewegliche Lasten anzunähern. Allgemeine Methoden zur direkten Lösung dieses Problems liegen jedoch zurzeit noch nicht vor.

Wir haben gezeigt, wie ein jedes einer Reihe von Problemen der plastischen Analyse und Bemessung von Tragwerken als eine lineare Optimierungsaufgabe formuliert werden kann. Das Anziehende dieser Formulierung ist, dass dadurch ein und dieselbe numerische Methode auf verschiedenartige Probleme der Baustatik angewandt werden kann. Wir wollen nun diese Methode kurz besprechen. Um die Schreibarbeit gering zu halten, betrachten wir die durch die Zeilen der Tafel III dargestellte, lineare Optimierungsaufgabe und nehmen für die Abmessungen des Rahmens und die auf ihn einwirkenden Lasten die folgenden Werte an: $h = 5$ m, $l = 4$ m, $H = 1000$ kg, $P = 5000$ kg. Unter den Nebenbedingungen

$$(28) \quad 2c_1 + 2c_3 \leq 5 \\ 2c_1 + 4c_2 + 4c_3 \leq 13$$

für die nichtnegativen Veränderlichen c_1, c_2, c_3 soll dann der Ausdruck

$$(29) \quad C = 5000c_1 + 20000c_2 + 25000c_3$$

zu einem Maximum gemacht werden.

Wir schreiben zunächst die Nebenbedingungen (28) in der Form

$$(30) \quad k_1 = -2c_1 - 2c_3 + 5 \geq 0, \\ k_2 = -2c_1 - 4c_2 - 4c_3 + 13 \geq 0,$$

wobei k_1 und k_2 durch diese Beziehungen definierte neue nichtnegative Veränderliche sind. Die Nebenbedingungen (30) sind offenbar durch die nichtnegativen Werte

$$(31) \quad c_1 = c_2 = c_3 = 0, \quad k_1 = 5, \quad k_2 = 13$$

erfüllt, für die $C = 0$ wird. Wir trachten nun, den Wert von C zu vergrössern, indem wir eine der Veränderlichen c_1, c_2, c_3 auf Kosten von k_1 und k_2 wachsen lassen. Da im Ausdruck (29) für C die Veränderliche c_3 den grössten Beiwert hat, soll c_3 wachsen, während c_1 und c_2 den Wert null beibehalten. Dem Betrag, um den c_3 wachsen kann, sind durch die Nichtnegativität von k_1 und k_2 Schranken gesetzt. Die Beziehungen (30) zeigen, dass mit $c_1 = c_2 = 0$ die Veränderliche k_1 für $c_3 = 5/2$ verschwindet und die Veränderliche k_2 für $c_3 = 13/4$. Wenn c_3 von null an stetig wächst, so verschwindet also k_1 für einen Wert von c_3 , für den k_2 noch positiv ausfällt.

Wir lösen nun die Definition von k_1 nach c_3 auf und setzen das Resultat in die Definition von k_2 und den Ausdruck für C ein; wir erhalten so

$$(32) \quad c_3 = -c_1 - \frac{1}{2}k_1 + \frac{5}{2} \geq 0, \\ k_2 = 2c_1 - 4c_2 + 2k_1 + 3 \geq 0, \\ C = -20000c_1 + 20000c_2 - 12500k_1 + 62500$$

Die neuen Nebenbedingungen sind durch die Werte $c_1 = c_2 = k_1 = 0, c_3 = 5/2, k_2 = 3$ erfüllt, für die $C = 62500$ wird. Der Uebergang von den Beziehungen (28), (29) zu den Beziehungen (32) kann als Austausch zwischen c_3 und k_1 charakterisiert werden. In der Tat gingen wir von einer Lösung der Beziehungen (28) aus, für die $c_1 = c_2 = c_3 = 0$ war, und sind nun zu einer Lösung der ersten zwei Bezie-

hungen (32) gelangt, für welche c_1 und c_2 immer noch null sind, aber k_1 anstelle von c_3 verschwindet.

Aus den Vorzeichen im neuen Ausdruck C ergibt sich infolge der Nichtnegativität von c_1 , c_2 und k_1 , dass eine weitere Vergrößerung von C nur durch einen c_2 betreffenden Austausch bewirkt werden kann. Da die erste Beziehung (28) die Veränderliche c_2 nicht enthält, kann dieser Austausch nur durch Auflösen der zweiten Beziehung (28) nach c_3 erhalten werden. Indem man die so gefundene Beziehung zur unveränderten ersten Beziehung (28) hinzufügt, findet man die folgenden neuen Nebenbedingungen:

$$(33) \quad \begin{aligned} c_3 &= -c_1 - \frac{1}{2}k_1 + \frac{5}{2} \geq 0, \\ c_2 &= \frac{1}{2}c_1 - \frac{1}{4}k_2 + \frac{1}{2}k_1 + \frac{3}{4} \geq 0. \end{aligned}$$

Einsetzen von (33) in die dritte Beziehung (32) liefert

$$(34) \quad C = -10\,000c_1 - 5\,000k_2 - 2\,500k_1 + 77\,500$$

Da die Beiwerte der nichtnegativen Grössen c_1 , k_2 , k_1 in (34) negativ sind, entspricht das Maximum von C den Werten $c_1 = k_2 = k_1 = 0$ und beträgt somit $C = 77\,500$. Dieser Maximalwert von C ist aber der gesuchte Minimalwert des veränderlichen Anteils des Konstruktionspreises. Ueberdies ergibt die Beziehung (34) die Fliessmomente F_1 und F_2 , welche zu diesem Mindestpreis führen. Es zeigt sich nämlich, dass die negativ genommenen Beiwerte von k_1 und k_2 im endgültigen Ausdruck (34) für C mit den Fliessmomenten F_1 und F_2 der optimalen Bemessung übereinstimmen. In der Tat bestätigt man leicht, dass die so erhaltenen Werte

$$F_1 = 2\,500, \quad F_2 = 5\,000,$$

die als mkg zu deuten sind, die Nebenbedingungen der zur oben betrachteten linearen Optimierungsaufgabe dualen Aufgabe erfüllen und gleichfalls $C = F_1h + F_2(h + 2l) = 77\,500$ liefern.

Wir haben hier das sogenannte Austauschverfahren der linearen Optimierung mit grosser Ausführlichkeit besprochen. Es versteht sich von selbst, dass man bei der praktischen Anwendung dieses Verfahrens nicht die verschiedenen Beziehungen ausführlich anschreiben, sondern unmittelbar das Koeffizientenschema umformen wird. Die Zeit erlaubt uns nicht, auf diese sehr einfache Umformung einzugehen. Eine besonders übersichtliche Darstellung der Umformung findet sich in Professor Stiefels vor kurzem erschienenen «Einführung in die numerische Mathematik» (B. G. Teubner Verlag, Stuttgart 1961).

Zum Schluss noch eine Bemerkung über den Arbeitsaufwand. Die Anzahl der notwendigen Austauschschritte, die bei

unserem einfachen Rahmen nur zwei betrug, wächst überaus rasch, wenn man zu mehrstöckigen, mehrfeldrigen Rahmen übergeht, so dass der Einsatz von Rechenautomaten unerlässlich wird. Die Programmbibliotheken grösserer automatischer Rechenanlagen enthalten fast immer erprobte Programme zur linearen Optimierung, die ohne weiteres zur Lösung der hier besprochenen Aufgaben verwandt werden können.

Adresse des Verfassers: Prof. W. Prager, Division of Applied Mechanics, Brown University, Providence 12, R. I., USA

Gasturbinen der Fiatwerke

DK 621.438

Nach Mitteilungen der Fiat Stabilimento Grandi Motori in Turin

Die Fiatwerke stellen ausser Dieselmotoren¹⁾ neuerdings auch Gasturbinen für Energieerzeugung, Verdichtung von Luft oder Gasen, Schiffsantrieb und andere Zwecke her. Sie können sowohl mit flüssigen als auch mit gasförmigen Brennstoffen betrieben werden. Es wurden Einrichtungen geschaffen, die ein selbsttätiges Umschalten von einem Brennstoff auf den anderen gestatten. Der Leistungsbereich erstreckt sich von 4900 bis 50 000 PS. Die Anlagen für Leistungen bis etwa 35 000 PS bestehen in der Regel aus einer einfachen Maschinengruppe, bei der Turbine und Kompressor auf der gleichen Welle angeordnet sind. Sie arbeiten nach dem Verfahren mit offenem Kreislauf und werden mit oder ohne Wärmeaustauscher geliefert. Die Verbrennung erfolgt in mehreren Brennkammern, die sich coaxial zwischen Kompressor und Turbine befinden. Dadurch ergibt sich eine raumsparende Anordnung.

Bis Ende 1961 sind insgesamt 15 Gasturbinenanlagen von je 6400 kW teils bereits fertiggestellt worden, teils noch in Ausführung begriffen, wovon elf für Argentinien bestimmt sind und vier für Algerien. Von diesen zeigt Bild 1 eine Gruppe im thermischen Kraftwerk Haoud El Hamra in der algerischen Sahara. Sie dient der Energieversorgung des Erdölzentrums Hassi Messaud sowie der Hauptpumpstationen der 670 km langen Oelleitung, die zum Mittelmeer führt. Die hohen Aussentemperaturen sowie die in dieser Gegend häufig auftretenden Sandstürme erschweren beträchtlich die Betriebsbedingungen und erforderten besondere Vorkehrungen. Die Anlage kam im April 1960 in Betrieb und hat von Anfang an zufriedenstellend gearbeitet.

¹⁾ Ueber Fiat-Grossmotoren wurde in SBZ 1961, Heft 39, S. 671 und Heft 42, S. 737 berichtet.

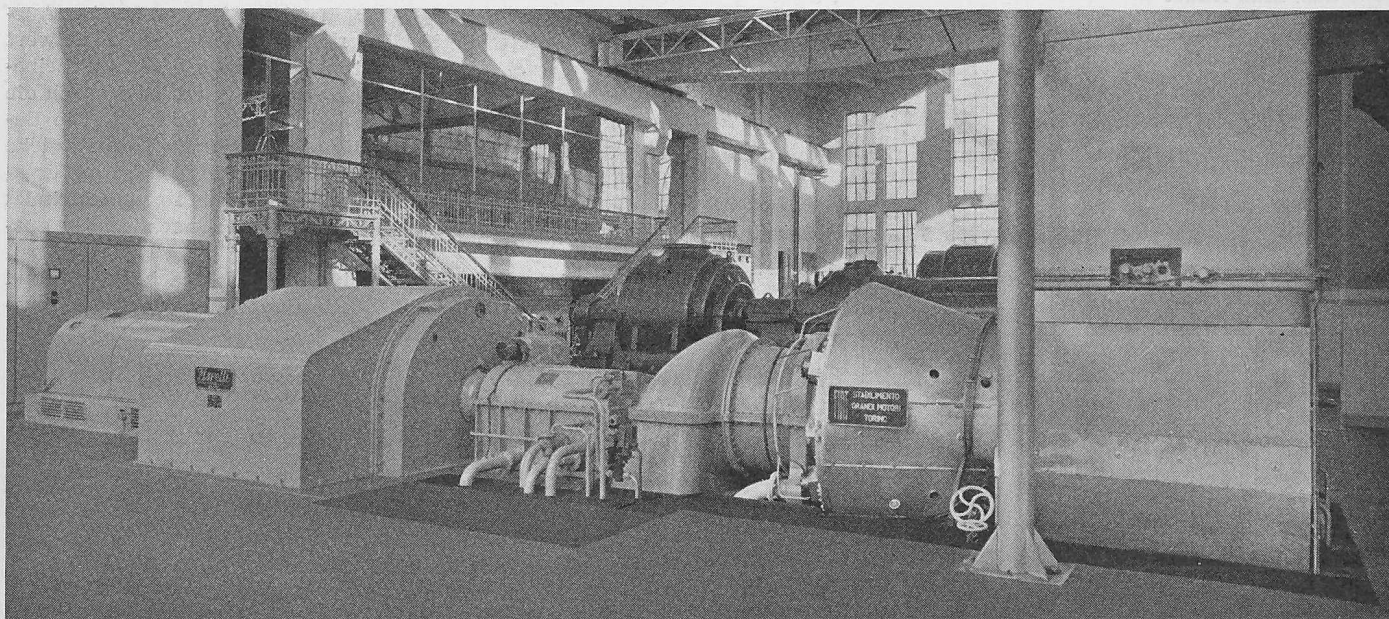


Bild 1. Gasturbinenanlage von 6400 kW im thermischen Kraftwerk Haoud El Hamra