FORSCHUNGSZENTRUM DER LUFTFAHRTINDUSTRIE

Vorträge und Abhandlungen Nr. 8

Obering. Franz Griebsch

Die Perspektive der Flugzeugfertigung

Als Manuskript gedruckt

Mit der Herausgabe beauftragt:

ZENTRALSTELLE FÜR LITERATUR UND LEHRMITTEL

Dresden 1959

Als Manuskript gedruckt
1959

Nachdruck, Reproduktion und Nachbildung – auch auszugsweise –
nur mit Genehmigung des Verfassers und
der Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel
im Forschungszentrum der Luftfahrtindustrie
Dresden N 2 – Postschließfach 40

III-9-266 IG 016 559 412 1,5

V o r w o r t

Diese Schrift enthält zwei von Herrn Obering. F. Griebsch für besondere Zwecke vorbereitete Vorträge. Ausgehend von der bisherigen Entwicklung und dem augenblicklichen Stand der Flugzeugfertigung werden Schlußfolgerungen für zukünftige Möglichkeiten und Wege auf diesem Gebiet gewonnen. Besonders beachtet werden dabei die erkennbaren Entwicklungstendenzen und ihr Einfluß auf die Wechselbeziehungen zwischen Bauweise, Werkstoff und Fertigungsverfahren.

Die beiden Vorträge sind eine wertvolle Ergänzung und Erweiterung der vom gleichen Autor gehaltenen Vorlesung "Die Fertigung im Flugzeug-Zellenbau", die in vier Bänden von der Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel herausgegeben wurde.

Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel
Abt. Lehrmittelentwicklung

Anm. Aus drucktechnischen Gründen werden alle Halbtonbilder auf besonderen Bildseiten zusammengefaßt und am Ende des Buchs eingeheftet. Wir bitten Sie, die einzelnen Bilder auszuschneiden und an den entsprechenden Stellen im Text einzukleben.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	
Inhaltsverzeichnis	
1 Forderungen der Flugzeugentwicklung an die Technologie	1
1.1 Spanende (abtragende) Formung	6
1.2 Spanlose Formung	11
1.3 Verbindungsprobleme	21
1.4 Integralplatten - Fertigungsmöglichkeiten und -probleme	27
1.5 Zusammenfassung	32
2 Entwicklungstendenzen im Flugzeugbau und ihre Auswirkung auf Bauweise, Baustoffe und Arbeitsverfahren	34
2.1 Übersicht über die Entwicklung	34
2.2 Baustoff und Festigkeit	37
2.3 Entwicklung im Bereich der spanlosen und spanenden Formung	42
2.4 Probleme der Verbindung	46
2.5 Baustoffe und Bauweisen im Zusammenhang mit der Entwicklung von Arbeitsverfahren für leichte Bauelemente	50
2.6 Zusammenfassung	61

Forderungen der Flugzeugentwicklung an die Technologie

Die bisherige Entwicklung des Flugzeugbaus läßt deutlich Zusammenhänge sichtbar werden, die nicht nur heute, sondern auch in der Zukunft vorhanden sein müssen. Es ist klar zu erkennen, daß die konstruktiven Gesichtspunkte für Zelle, Triebwerk und Geräte in einem engen Zusammenhang mit der Entwicklung der Baustoffe und der Fertigungstechnik stehen. Die Bauweise der Flugzeuge wird also nicht allein von den Prinzipien bestimmt, die sich aus flugtechnischen Forschungen und Berechnungen ergeben, sondern hängt in hohem Maße von den Entwicklungen geeigneter leichter, hochfester und auch warmfester Baustoffe ab. Außerdem ist der Fortschritt der Fertigungsmöglichkeiten, also der Arbeitsverfahren, Maschinen und Einrichtungen, von großem Einfluß. In ihrer technischen Abhängigkeit haben sich diese drei Gebiete stets gegenseitig beeinflußt und durch ihre Anforderungen aufwärts entwickelt. Dabei kann festgestellt werden, daß diese Entwicklung auch auf eine ganze Reihe anderer Industrien außerordentlich fördernd gewirkt hat.

Die hier durchgeführte Betrachtung befaßt sich insbesondere mit den Zusammenhängen zwischen der Objektentwicklung und der Fertigungstechnik, also mit der Technologie (Bild 1.01). Die wichtigsten Gebiete der Technologie sind der Vorrichtungsbau, das Messen, die Arbeitsverfahren des Verbindens, der spanlosen und der spanenden Formung (Abtragen).

Der Flugzeugbau stellt an die Technologie auf den drei Gebieten Zellen-, Triebwerk- und Gerätebau ständig neue Forderungen. Diese entspringen den durch die menschlichen Bedürfnisse und Beziehungen zueinander ständig gesteigerten Anforderungen an die Flugtechnik. In kurzer Zusammenfassung lassen sich in den einzelnen Gebieten folgende Besonderheiten erkennen.

Im Zellenbau führt die steigende Fluggeschwindigkeit in bestimmter Zielstrebigkeit zu immer besseren aerodynamischen Außenprofilen und zu immer höheren Ansprüchen be-

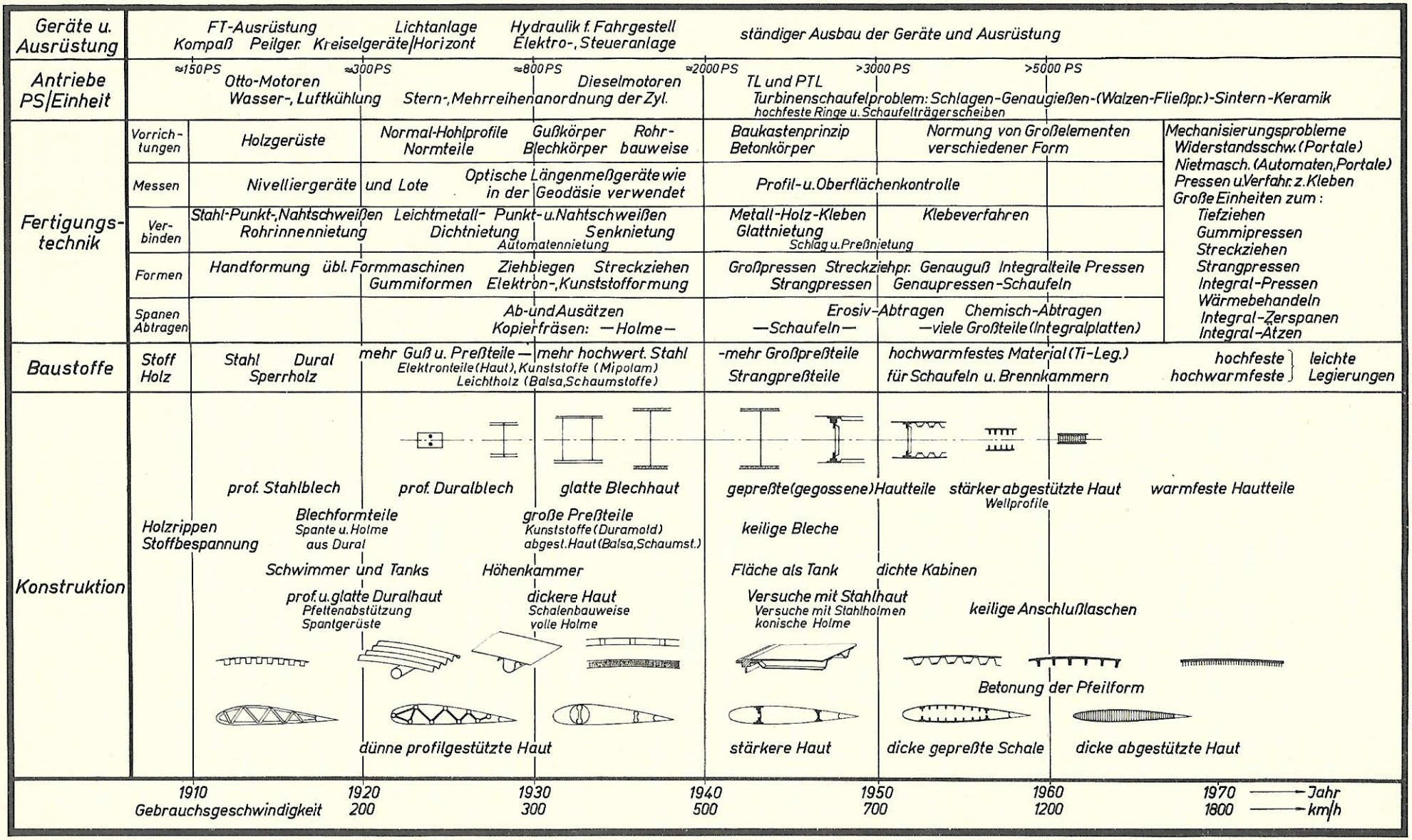


Bild 1.01: Fertigungsprobleme in der Entwicklung des Flugzeugbaus

züglich der Oberflächenglätte und Formgenauigkeit. Der Flug mit Überschallgeschwindigkeit wirft das Problem der Erwärmung bestimmter Teile der Zellenkonstruktion auf. Des weiteren bedingt der Flug in großen Höhen den Dichtbau großer Teile der Zelle und entsprechende Anlagen zur Regelung des Innendrucks.

Die Anhäufung der Kräfte in den Elementen der tragenden Außenhaut, insbesondere in den immer dünner werdenden Tragflächenprofilen, ergibt für die Fertigung die Notwendigkeit, hochfesten Werkstoff in konische und keilige Formen zu bringen. Die Verwendung keiliger Elemente wird mit immer größerer Konsequenz gefordert, um ein Minimum an Gewicht zu erreichen. Es wird also notwendig, entweder die keilige oder konische Form durch spanende Formung herzustellen oder zur Vermeidung des großen Abtragungsaufwands immer mehr große Teile konisch zu walzen oder zu pressen. Beim Spanen werden oftmals innere Spannungen in den bearbeiteten Teilen frei, so daß starke Verwerfungen auftreten, die zusätzliche Richtarbeit erfordern. Außerdem können sich neue verwerfende Spannungen bilden, wenn bei der Spanung örtliche Erhitzungen und Abkühlungen stattfinden. In den Trennstellen müssen die hochbelasteten Anschlußelemente den Kräftefluß mit immer genaueren Passungen übernehmen. Entsprechend genau arbeitende Maschinen, Einrichtungen und genaue Lehren werden erforderlich.

Auch die geforderte Genauigkeit der Außenform und die notwendige Glätte der Oberflächen kompliziert die Fertigungsverfahren. Insbesondere ist die genaue Übertragung der Formrisse vom ersten Strak über Arbeitsschablonen und Vorrichtungen bis zum Werkstück in höchstem Maße zu gewährleisten. Auch die Erzielung einer glatten Oberfläche an Hautstößen und im Bereich der einzelnen Niete erschwert die Fertigung. Die beim Überschallflug zu erwartende Erwärmung führt zur Anwendung hochwarmfester Baustoffe wie Stahl- und Titanlegierungen, die im allgemeinen schwierig zu bearbeiten sind und neue Arbeitsverfahren erfordern.

Der Dichtbau der Flugzeugzellen ist zwar in seinen Grundzügen entwickelt, aber die notwendige Weiterentwicklung der Dichtstoffe, insbesondere in der Richtung größerer Warmfestigkeit, stellt immer neue Ansprüche bezüglich der Arbeitsverfahren.

Im T r i e b w e r k b a u verändert die Entwicklung vom Kolbenmotor über das Propellerturbinentriebwerk zum Strahltriebwerk den technologischen Aufbau der Werke tiefgreifend. Die mit hoher Drehzahl rotierenden, stark erhitzten Präzisionsteile erfordern bei der Herstellung fortlaufend die Beherrschung und Entwicklung von vielerlei komplizierten Arbeitsvorgängen. Auch die hochwarmfesten Blechteile der Strahltriebwerke führen zu besonderen Fertigungsverfahren.

Die hochwertigen Genauteile, wie Turbinenschaufeln, Schaufelträger und Lagerungen erfordern die Weiterentwicklung sowohl besonderer Formungsverfahren und Einrichtungen als auch der Präzisionsmaschinen zur spanenden Bearbeitung.

Der G e r ä t e b a u ist ein bedeutsames Arbeitsgebiet des Flugzeugbaus geworden. Die großen Stahlteile des Fahrwerks mit ihrer hydraulischen Mechanik enthalten mancherlei Probleme der spanlosen Formgebung und Wärmebehandlung. Auch die spanende Feinstbearbeitung langer Zylinder ist problematisch.

Viele technologische Fragen entstehen aber auch aus der Mechanik der Steuerorgane und der ständig zunehmenden Anwendung elektrischer Einrichtungen und komplizierter Geräte verschiedener Art.

Die F e r t i g u n g s e n t w i c k l u n g (Bild 1.02) muß diesen aufgezeigten Forderungen ständig nachkommen. Sie hat aber auch, wie jedes technische Gebiet, eine starke Eigenentwicklung, die dem Zellen- und Triebwerkkonstrukteur die Verbesserung der Konstruktionen und Bauweisen erschließt.

Die Arbeitsgebiete Vorrichtungsbau, Messen, spanende und spanlose Formung und Verbinden haben schon immer im Flugzeugbau eine sehr spezielle Entwicklung von Maschinen ausgelöst, die stets der Werkzeug- und Maschinenindustrie fordernd gegenüberstand und somit auch für andere Industriezweige sehr fruchtbar war. Insbesondere gilt dies für den Blechbau im Sinne des Leichtbaus und für die Verwendung von Leichtmetallen und anderen hochwertigen Baustoffen.

Der V o r r i c h t u n g s b a u mußte für die Fertigung der großen, weitspannenden Konstruktionselemente zunächst ganz neue Wege gehen und muß auch weiterhin für die sich entwickelnden

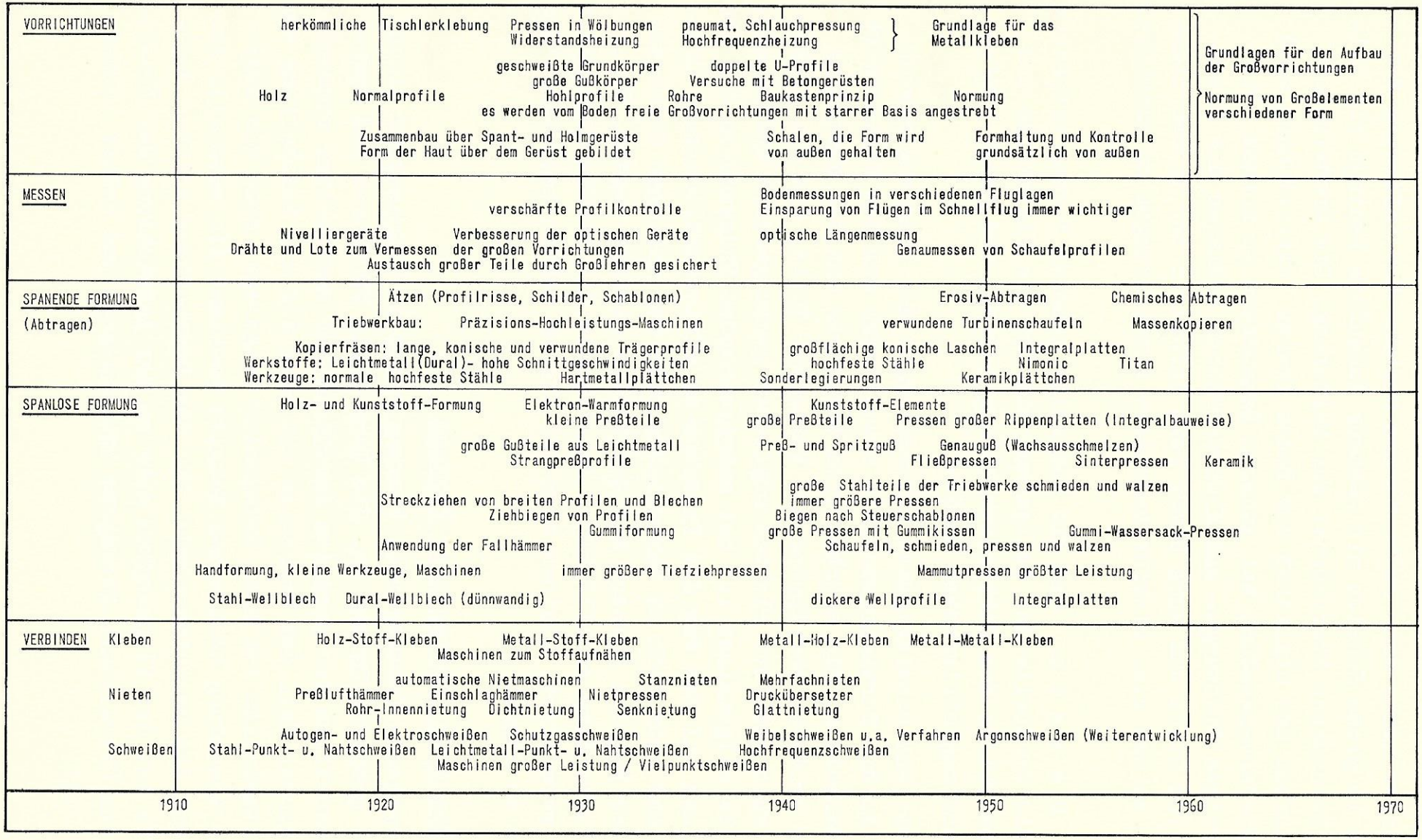


Bild 1.02: Fertigungsentwicklung im Flugzeugbau

Bauweisen immer neue Aufbauformen suchen. Die Auflösung der Zelle in große Schalen mit genauer Außenform bedingt die Bildung besonderer Starrkörper zur Halterung. Die Großelemente zum Aufbau der möglichst vom Boden freien Vorrichtungen sind zur Wiederverwendung bei anderen Baumustern zu normen. Die neuartigen Dichtungs- und Klebeverfahren bedingen die Anwendung von Druck und auch Wärme beim Aufbau in der Großvorrichtung, so daß u.a. hierfür besondere Einrichtungen zu entwickeln sind.

Das M e s s e n und die Kontrolle genauer Formen erfordert für die Großteile des Zellenbaus wie für die Kleinteile des Triebwerkbaus die Weiterentwicklung schnell und genau prüfender und registrierender Geräte.

Die weitaus schwierigsten Anforderungen der Flugzeugentwicklung an die Fertigungstechnik resultieren aus dem Fortschritt der Bauweisen. Sie ergeben sich besonders aus der Anwendung immer größerer verrippter und konischer Teile, die als große, z.T. auch gewölbte Platten möglichst genau geformt werden müssen. Im allgemeinen ist bei entsprechenden Stückzahlen die Herstellung auf dem Weg des Pressens am wirtschaftlichsten. Oftmals muß aber doch im Versuchsbau oder bei geringen Stückzahlen der Weg des Spanens aus dem Vollen gewählt werden. Obgleich die Verwendung großflächiger Bauelemente die Verbindungsarbeit sehr vermindert, bleiben auch auf diesem Gebiet bedeutende Probleme zu lösen.

1.1 Spanende (abtragende) Formung

Die spanende (abtragende) Formung nimmt im Flugzeugbau einen immer größeren Umfang an. Sie kann viele Verfahren und Werkzeugmaschinen des normalen Maschinenbaus unmittelbar verwenden. Ein großer Teil der Maschinen ist aber für die Bearbeitung von Leichtmetallen für hohe Drehzahlen ausgelegt. Auch die steigende Anwendung hochfester Metalle bestimmt die spezielle Ausbildung des Maschinenparks. Für die Bearbeitung solcher Werkstoffe ist der Flugzeugbau sehr an der Entwicklung des Erosiv- und des Ultraschall-Abtragens interessiert und selbst lebhaft beteiligt.

Spezifische Probleme sind aber die spanende Bearbeitung großflächiger und langer Teile mit komplizierten, oft konischen oder keiligen Formen. Die seit langem verwendeten Trägerholme und die breiten, konischen Anschlußlaschen an der Flügelwurzel erforderten schon früher die Ausbildung besonderer Fräswerke mit Kopiereinrichtungen für die z.T. verwundenen, konischen Formen. Die Entwicklung zur dicken Flügelhaut führt immer mehr zur Anwendung großer gewölbter und verrippter Hautplatten.

Fertigungsaufgaben	Fertigungsbeispiele	Fertigungsprobleme
Großflächige Teile Große keilige Flächen a) abtragen, dann umformen b) in der Form abtragen (kopieren) Große verrippte Flächen (Integral) a) aus dem Vollen abtragen b) gepreßte Teile fertig abtragen	keilige Laschenbleche Integralplatten I >2000 II aus einem Stück mit Paßstoß	Große Fräswerke (zum Kopieren eingerichtet) Spannfläche ≈2000×1500 Maschinenformen: a) Schlitten beweglich b) Portal beweglich } hochtourige Fräser c) Gelenkarm nach dem Fräsen nachrichten Biegepressen Rollbiegen Große Ätzanlagen zeitgeregelte Taucheinrichtung Tiefe gleich Ätzlänge Vorgang: Reinigen Abdecken Ätzen Spülen Ätzbad Reinigungsbäder
Verwundene, keilige und konische Profile	Holmgurtprofile >15m Länge	
Große Genauteile der Triebwerke	Turbinenscheiben Turbinenringe	Präzise arbeitende Drehmaschinen Sonderarbeiten: Kopier-Drehen Feinstbearbeitung
Kleine Genauteile der Triebwerke (insbesondere Schaufeln)	Verdichterschaufeln aus Dural für Rotor und Stator Turbinenschaufeln aus hochwarmfestem Werkstoff (z.B. Titan, Nimonik u.a.) für Rotor und Stator	Präzise arbeitende Zerspanungsmaschinen aller Art, besonders Schaufelkopiermaschinen für eine Mehrzahl von Schaufeln. Die Schaufelarten wechseln häufig bei relativ geringer Stückzahl. Dreh-, Fräs-, Schleif- und Poliervorgänge

Bild 1.03: Probleme der spanenden Formung (Abtragung) im Flugzeugbau

Wenn sie aus einem Stück gefertigt werden können, wird viel Verbindungsarbeit eingespart. Die gleichzeitig entstehende Notwendigkeit, solche Platten spanend zu erzeugen, soweit Preßvorgänge nicht anwendbar sind, erfordert die Aufstellung entsprechend großer Fräswerke, die zweckmäßig nach dem Kopierverfahren arbeiten. Im Zellenbau sind aber auch sehr einfach scheinende Vorgänge, wie das Bohren von versenkten Nietbohrungen, immer noch schwierige Aufgaben, weil das Genau- und Dichtnieten eine außerordentliche Präzision der Bohrungen und Senkungen erfordert. Die hochwertigen Stahlteile der Fahrwerke, insbesondere die langen Hydraulik-Zylinder, müssen z.T. ebenfalls auf Hochleistungs- und Sondermaschinen bearbeitet werden.

Im Triebwerkbau stellen einerseits die großen Genauteile des Rotors und Stators besondere Anforderungen an den Maschinenpark, andererseits ist die Bearbeitung der kleinen Genauteile, u.a. der Schaufeln, ein in der Entwicklung befindliches Abtragungs-Problem.

An einigen Bildbeispielen sollen kurz die Art und die Größenordnung der erforderlichen Maschinen gekennzeichnet werden. Den Aufbau einer langen Gurtfräsmaschine mit wanderndem Fräsportal zeigt das Bild 1.04. Die Fräs-Aggregate werden von längs gelagerten Schablonen gesteuert. Die Raumfrage führt dazu, für Groß-Flächenfräsmaschinen, die für Integralplatten der Tragflächen Tischgrößen bis etwa 2 x 15 m haben können, ebenfalls das wandernde Portal anzuwenden. Für schmale, beliebig lange Platten lassen sich Radialoberfräsen mit Kopiereinrichtung (Bild 1.05) verwenden. Eine am Gerüst hängend geführte Oberfräse zeigt das Bild 1.06. Beide Oberfräseinrichtungen lassen sich durch zusätzliche Tische verlängern.

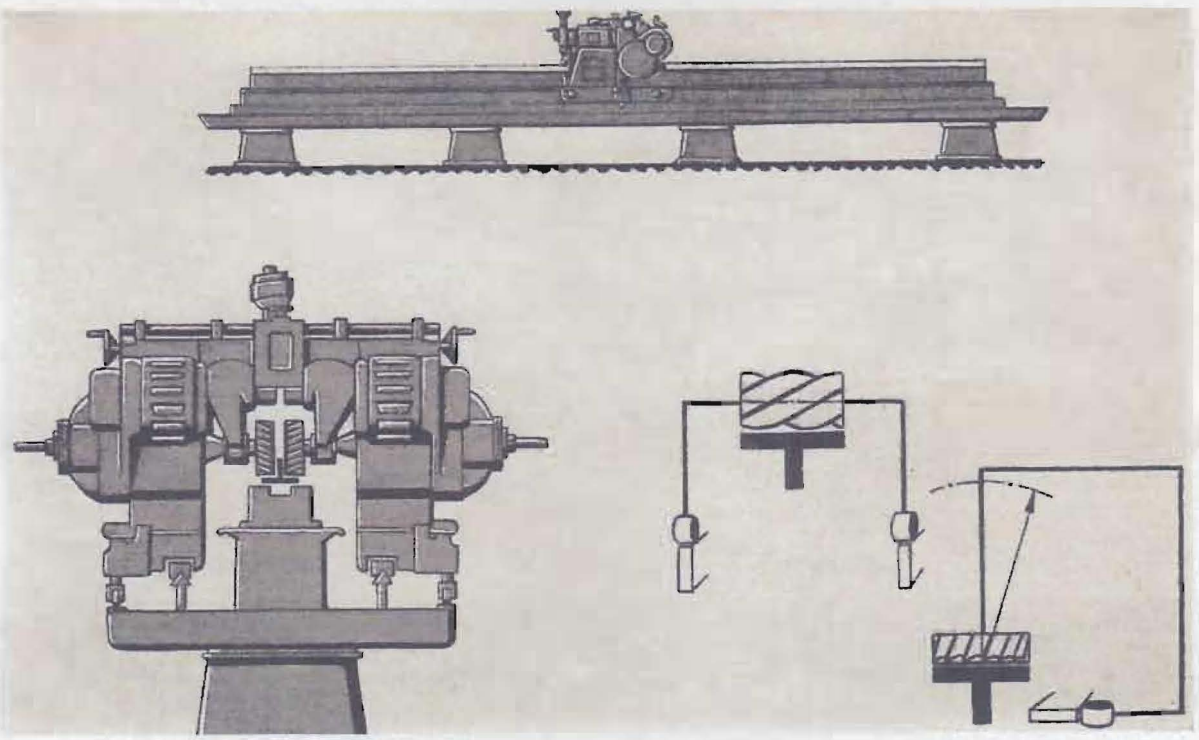


Bild 1.04: Gurtprofil-Kopierfräsmaschine

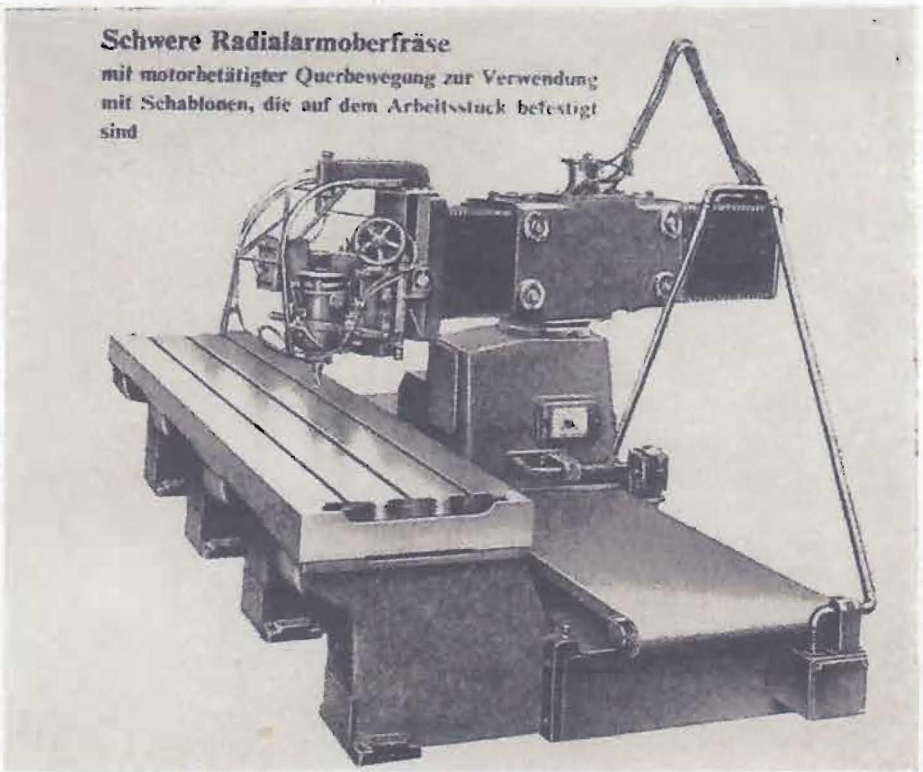


Bild 1.05: Radial-Oberfräse

Bild 1.06: Radial-Oberfräse mit oben liegender Schablone

Als Beispiel für die Maschinen zur Herstellung kleiner präziser Massenteile sei das Mehrfachkopieren von Turbinenschau-

feln (Bild 1.07) angeführt. Eine Schleifeinrichtung für derartige Schaufeln zeigt das Bild 1.08.

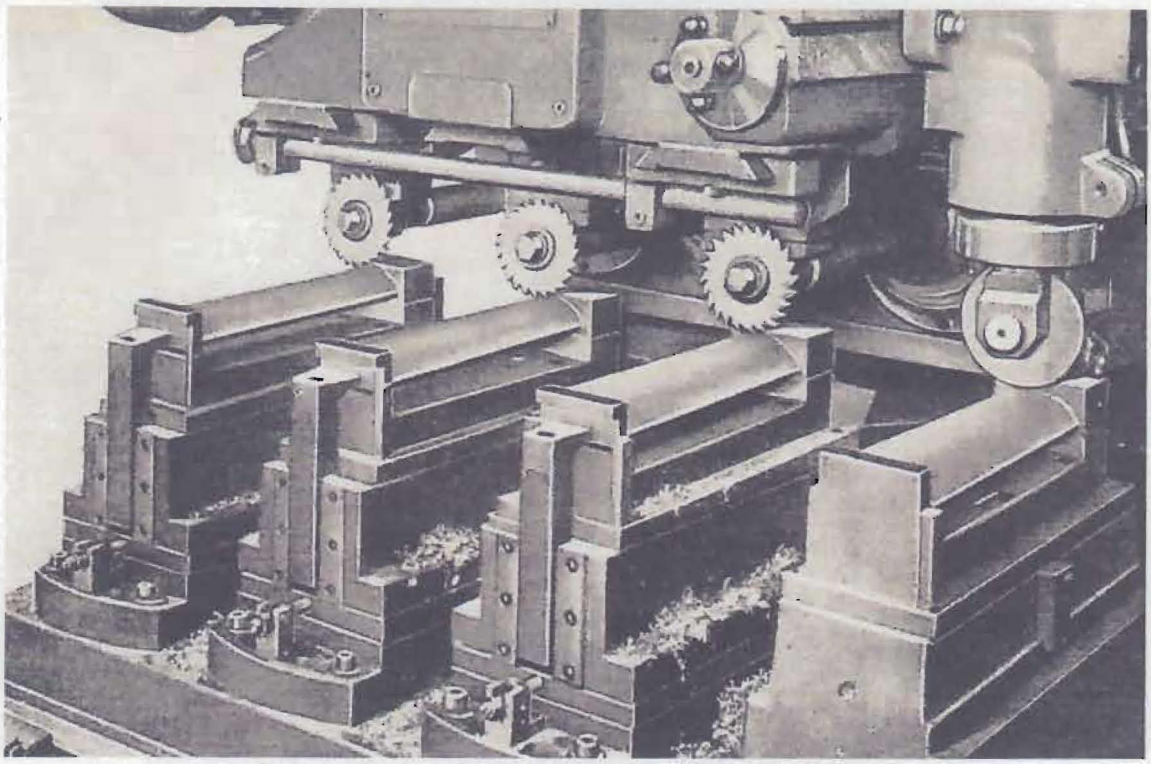


Bild 1.07: Schaufel-Kopierfräsmaschine

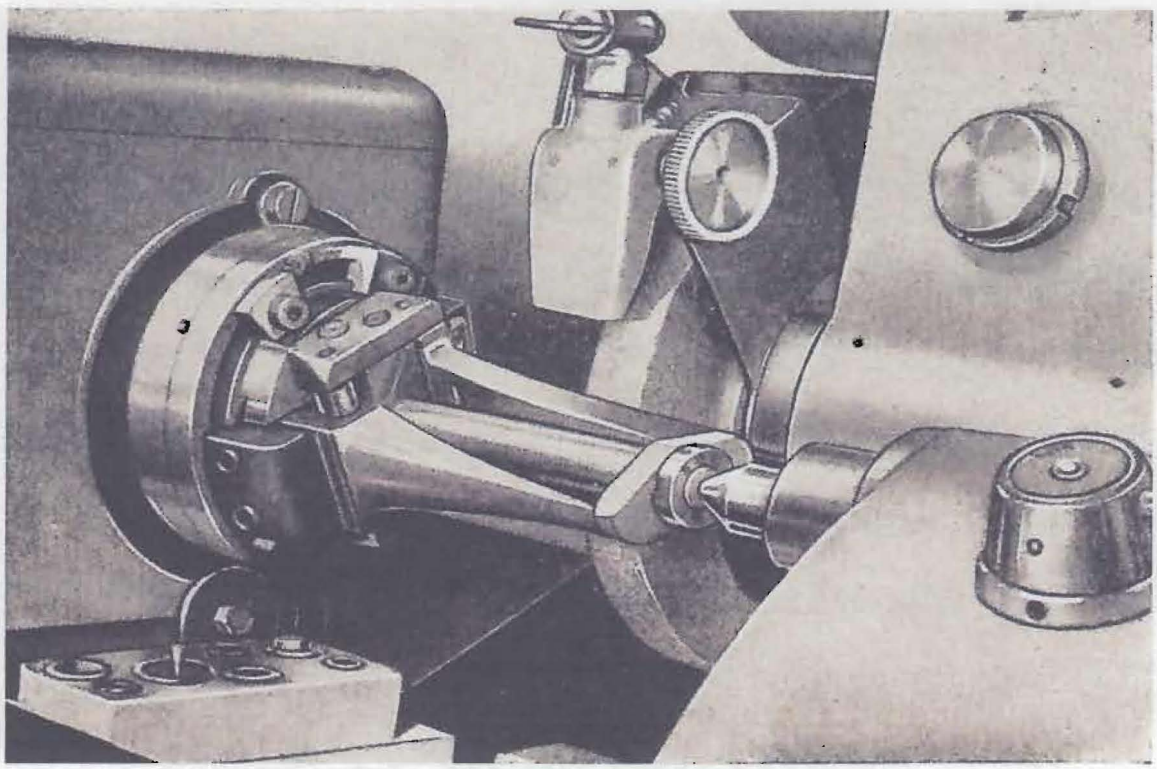


Bild 1.08: Schaufel-Kopierschleifmaschine

Es läßt sich z.Z. noch nicht übersehen, in welchem Umfang das chemische (ätzende) Abtragen die mechanisch-spanende Formung ablösen kann. Die Entwicklung dieses aus anderen Industriezweigen bekannten Verfahrens begann im Flugzeugbau mit dem Ätzen von Strakrissen und kleinen Metallflächen, wie z.B. Schildern, und mit dem Ausätzen von Schablonen aus Blechtafeln. Inzwischen ist man dazu übergegangen, auch große Tafeln oder Profile konisch abzuätzen und abgedeckte Partien, z.B. Rippen, stehen zu lassen. Zu diesem Verfahren gehören entsprechende Einrichtungen zum Säubern, Abdecken, Ätzen und Spülen. Bäder zur Aufnahme von z.T. gekrümmten Platten in der Größenordnung bis zu 2 x 15 m werden in der Perspektive gebraucht.

1.2 Spanlose Formung

Die spanlose Formung im Flugzeugbau (Bild 1.09) umfaßte ursprünglich vor allem große, gewölbte Blechteile aus Leichtmetall und stranggepreßte Profile. Guß-, Schmiede- und Preßteile aus Leichtmetall und Stahl wurden nur in geringem Umfang angewendet.

Fertigungsaufgaben	Fertigungsbeispiele	Fertigungsprobleme
Wärmebehandlungsanlagen zum Glühen und Veredeln	für große Blechtafeln >2000×5000 gekrümmte Blechteile große Preßteile verschiedener Form lange Profile bis 15m u. mehr Länge	I Länge>15m II Luftofen ≈500 °C Wasserbad Salpeterbad Wasserwanne
Große Blechteile formen Material geringer Dehnung (W95) Glüh- und Vergütungsvorgänge genaueste Form ohne Verzug geringe Stückzahlen große Werkzeuge schnell und billig herstellen	große gewölbte Flächen tiefgewölbte Verkleidungen Profile mit stark gebogener o. verwundener Form	Gummikissen Wassersack Tiefziehen mit großen Blechpressen Gummiformen Streckziehen
Profile verschiedener Form stranggepreßt und nachträglich gereckt, Profile oft noch konisch und verwundene Form	Profile verlaufen oft konisch, mit schrägen Flanschen; meist sehr lang	Rezipient Matrize Preßprofil Block Druckstempel Matr.-Formen für Integralplatten
Große Preß- u. Schmiedeteile große Außenplatten (hochfest - später auch warmfest) konisch verlaufend } genaue Form konische Verrippung } Preß- u. Schmiedeteile aus hoch-(warm)festem Werkstoff Stahlteile verschiedener Form, dünnwandige Trägerprofile, Profile mit größerem Querschn., Scheiben Ringe } für Turbinen Schaufeln Genauguß und Sintermat.-Keramik	später warmfest auch mit Querrippen bis>15m Länge>3m Breite Turbinenringe geschmiedet bzw. gewalzt gepreßt genau gegossen gesintert	I. Großflächenpressen für einen Druck von 10 - 15000 t/m² (bis 100000 t) II. Schmiedepressen großer Leistung III. Reckwalzen für Schaufeln IV. Fließpressen für Schaufeln V. Wachsausschmelz-Verfahren VI. Sinterpressen

Bild 1.09: Probleme der spanlosen Formung

Zur Formung großflächiger, gewölbter Blechteile können die großen Tiefziehpressen des Automobilbaus verwendet werden. Die im Flugzeugbau relativ geringe Stückzahl rückt das Werkzeugproblem stark in den Vordergrund. Holz- und Kunststoffwerkzeuge können billiger und schneller hergestellt werden. Die kleine Stückzahl und das schnell herzustellende, billige Werkzeug führten zur Großpresse mit einem Gummikissen. Aber auch für die Herstellung der vielen oft verwundenen Blechprofile mußten Sondermaschinen entwickelt werden, die nach den Prinzipien des Reckens und Biegens arbeiten. Mit der Vergrößerung der Bauelemente haben sich die hierfür notwendigen Maschinen in ihrer Größe und Technik entsprechend weiter entwickelt. Auch das bekannte Strangpressen von Profilen erforderte eine starke Entwicklung in der Größenordnung des Preßdrucks, der Rezipienten und der Matrizen.

Die mehrfach erwähnte Entwicklung der Hautteile von der genieteten dünnen Blechprofilkonstruktion zur verrippten großflächigen Schale verlangt wesentlich größere Presseneinheiten. Während zum Auspressen von großen Blechteilen im Gummi - Preßverfahren nur Drücke von etwa 300 bis 500 kg/cm^2 erforderlich sind, werden zum Pressen großer Rippenplatten aus dem Vollen 1000 bis 1500 kg/cm^2 und mehr benötigt.

Im Triebwerkbau sind ebenfalls Entwicklungen eingetreten, die zu kräftigen Formungsmaschinen führen. Die zum Aufbau von Rotor und Stator des Triebwerks erforderlichen Ring- und Scheibenprofile erreichen die notwendige Festigkeit nur bei richtiger Struktur durch entsprechende Schmiedeformung. Aber auch zur Formung der kleinen Genauteile des Triebwerks, wie z.B. Schaufeln, werden Sonderverfahren zum Schmieden, Fließpressen oder Walzen entwickelt. Für diesen Zweck muß auch das Genaugießen und die Formung aus Sintermaterial voll brauchbar gemacht werden.

Durch die spanlose Formung soll grundsätzlich die formende Nacharbeit und damit auch die Zerspanung vermindert oder ganz vermieden werden. Die Verfahren und Maschinen sind besonders in dieser Richtung zu entwickeln.

Zur spanlosen Formung sind im Flugzeugbau aber auch Wärmebehandlungsanlagen erforderlich, die der Größe der Bauteile entsprechen. Teile aus den bisher normalen Blechtafelgrößen konnten bislang noch mit Vorteil im Salzbad geglüht und veredelt werden.

Die Vergrößerung der Bauelemente zu Platten von 2 x 6 m und darüber hinaus, z.B. für Holme und Rippenplatten auf rund 12 bis 15 m, macht die Entwicklung von zuverlässigen Wärmebehandlungsanlagen mit Heißluft erforderlich. Es kommt besonders auf eine gleichmäßige Erwärmung in Grenzen von ± 5 °C an. Das Bild 1.10 zeigt einen Luftofen für lange Profile, der über einer entsprechend tiefen Grube zum Abschrecken verschoben werden kann.

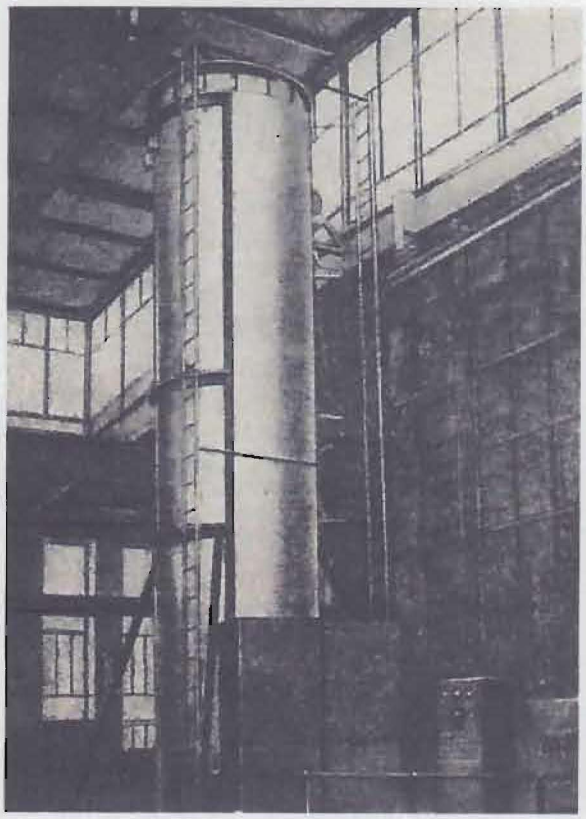


Bild 1.10: Stehender Ofen zur Wärmebehandlung langer Teile

Im Bild 1.11 hängt vor dem Ofen der Einsatz aus langen Profilen. Derartige Anlagen sind auch für große Platten erforderlich.

Zum Streckziehen von Profilen (Bild 1.12) wurden die früher kleineren Anlagen zu wesentlich größeren Maschinen entwickelt. Das Bild 1.13 zeigt den Aufbau einer derartigen Großanlage. Die im Bild 1.14 gezeigte Anlage reckt breite Profile in horizontaler Lage. Es handelt sich dabei um eine Weiterentwicklung der im Bild 1.15 dargestellten älteren Konstruktion. Auch diese vertikale Bauart ist heute in wesentlich größeren Einheiten zum Recken großer Blechtafeln in gewölbten Formen vielfach im Gebrauch.

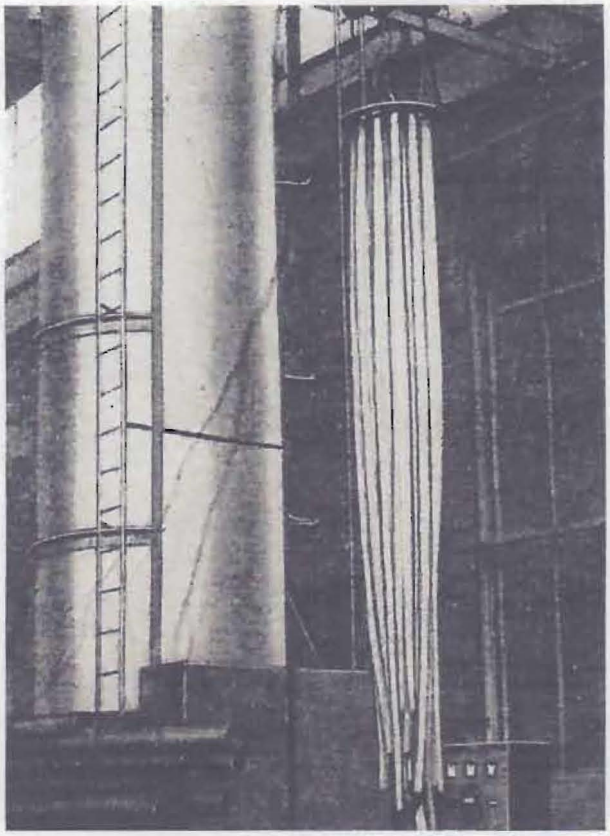


Bild 1.11: Vor dem Wärmebehandlungsofen hängendes Einsatzgut

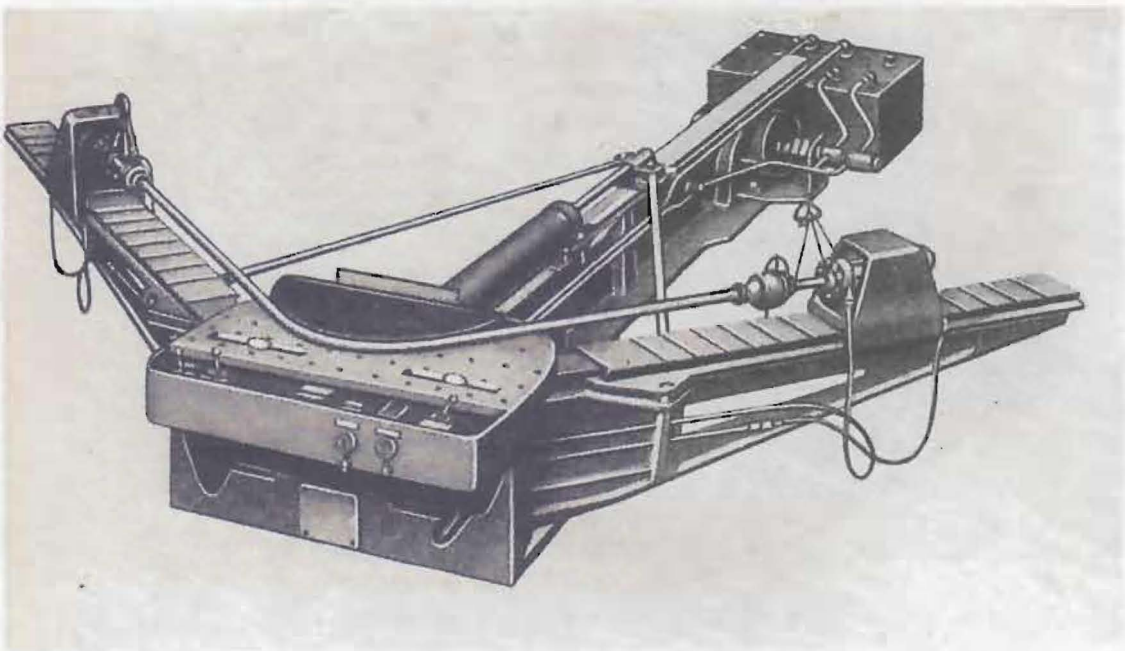


Bild 1.12: Streckziehbiegen von Profilen

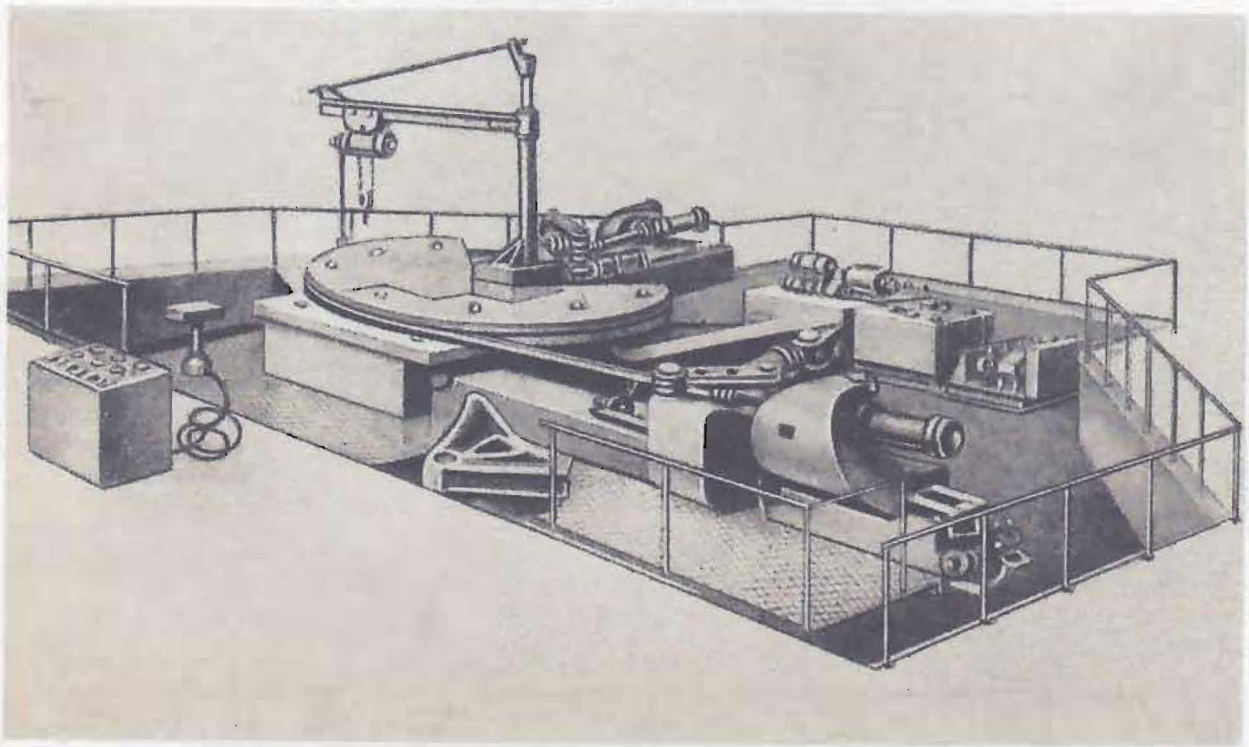


Bild 1.13: Mechanisierte Streckzieh-Einrichtung

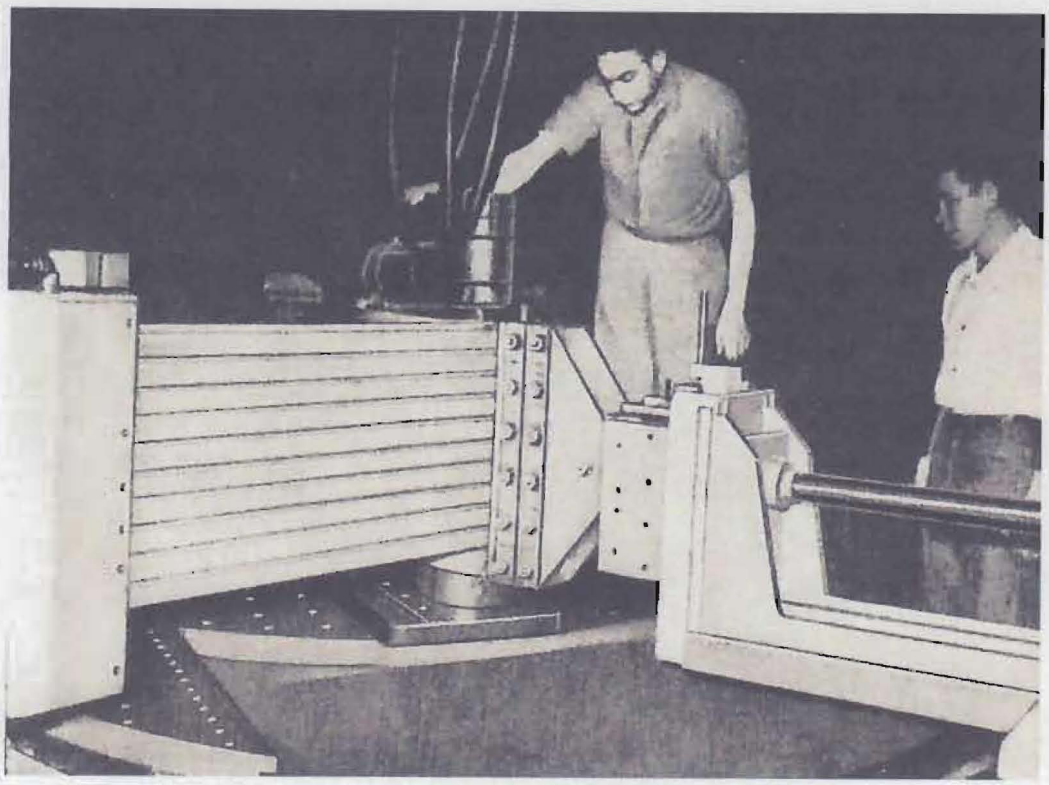


Bild 1.14: Streckziehen breiter Profile in horizontaler Lage

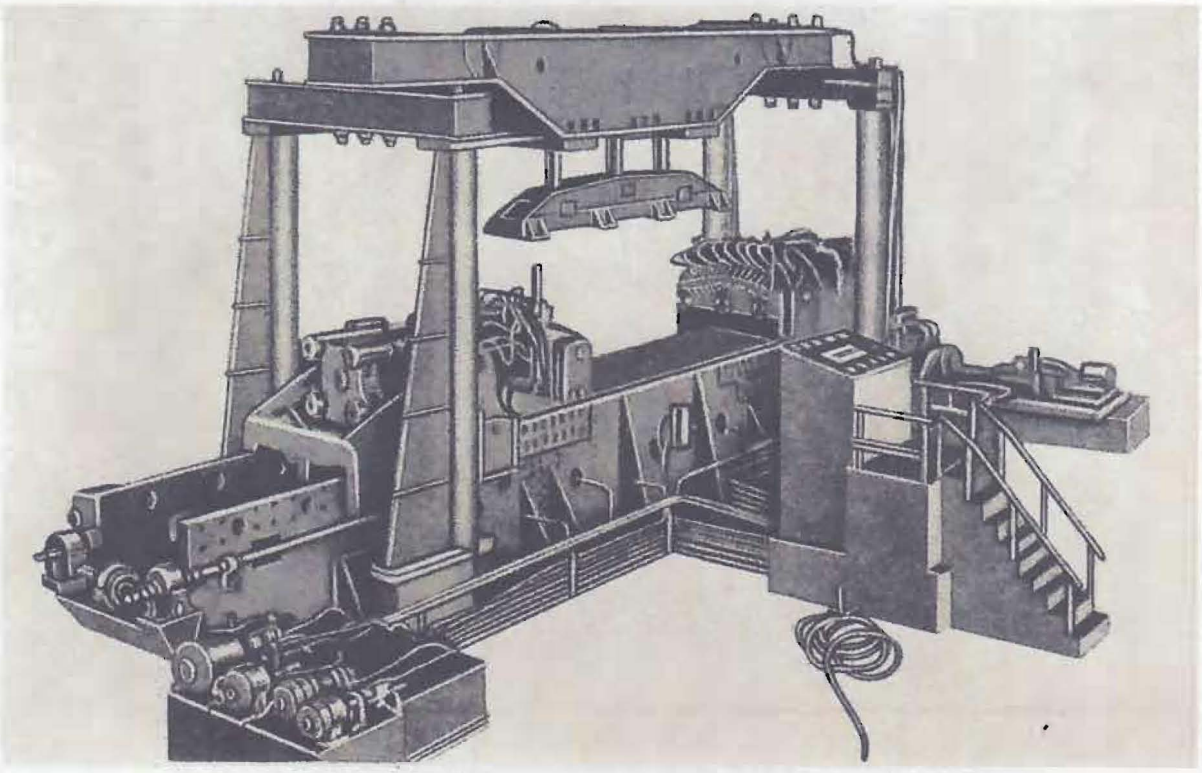


Bild 1.15: Streckziehen gewölbter Bleche

Das Strangpressen von Profilen zeigt in seinen Einzelvorgängen Bild 1.16. In vielen Fällen wird ein Nachrecken zur Steigerung der Festigkeit und ein Nachrichten erforderlich. Eine 3000 t - Strangpresse, wie sie im Walzwerk Hettstedt in Betrieb ist, zeigt Bild 1.17. Es wird z.Z. angestrebt, auch Integralplatten nach diesem Prinzip zu pressen. Zu diesem Zweck sind Pressen-einheiten von mindestens 10 000 bis 15 000 t erforderlich.

Zum Formen von Blechteilen mittels Gummikissen sind Pressen mit mehr als 4 000 t im Gebrauch. Das Bild 1.18 zeigt eine derartige Presse mit 2 500 t hydraulischem Druck. Sie enthält in zwei Etagen je ein Gummikissen. Es ist damit bei entsprechender Dimensionierung der Kissen möglich, zwei verschieden hohe spezifische Drücke zu erzeugen. Das Bild 1.19 zeigt die Presse als Schema im Betrieb. Eine Weiterentwicklung des Gummipressens ist das hydraulische Pressen über ein Gummipolster, wie es das Schema des Bilds 1.20 erläutert. Im Prinzip wird hier der Druck nicht mehr von einem niedergehenden Kolben, sondern über ein hydraulisch aufzuweitendes Kissen im Druckbehälter ausgeübt. Das Bild 1.21 zeigt eine solche Wasserpresse mit beiderseitiger Bedienanlage.

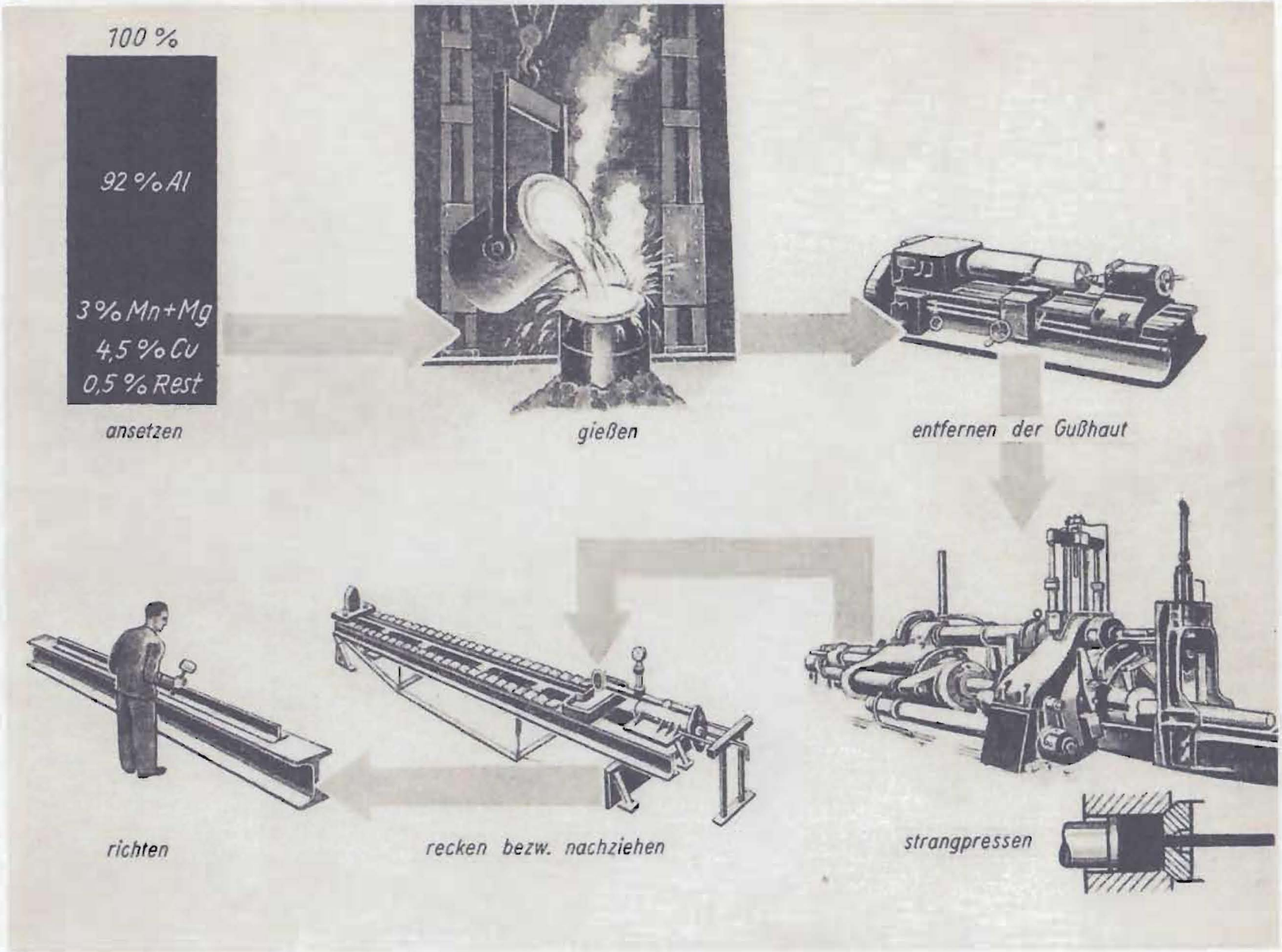


Bild 1.16: Herstellung von Strangpreßprofilen

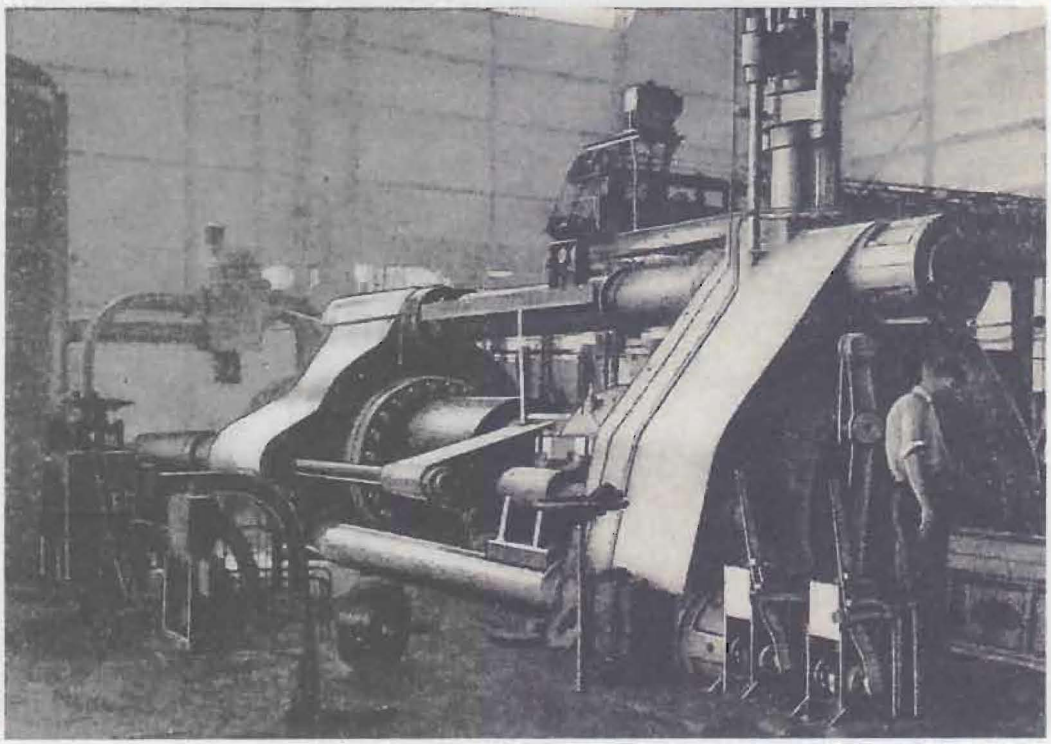


Bild 1.17: 3000 t-Strangpresse

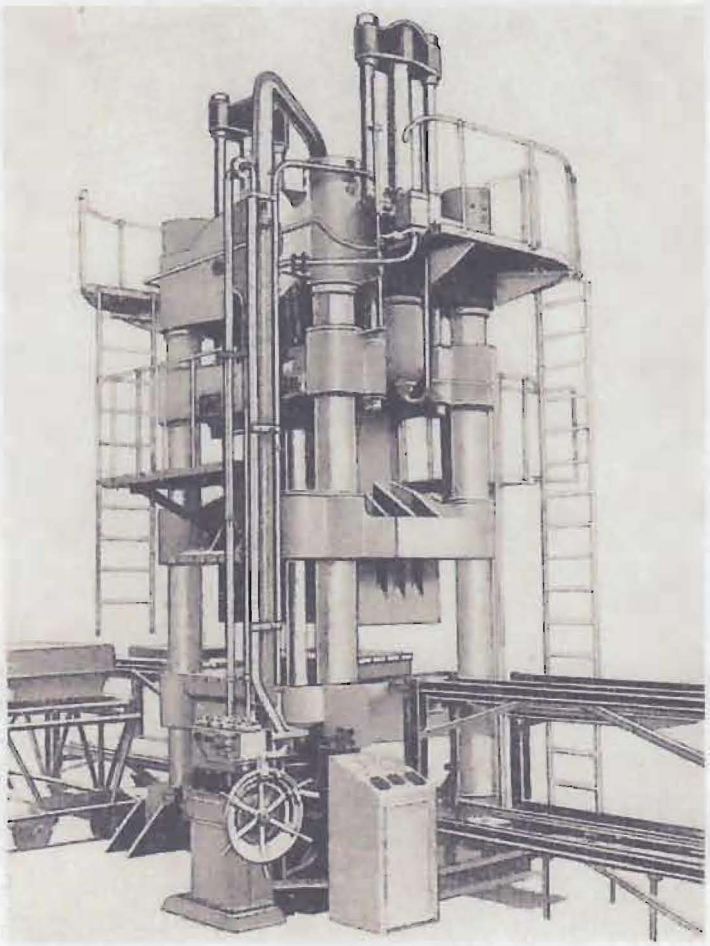


Bild 1.18: Zwei-Etagen-Gummipresse, 2500 t

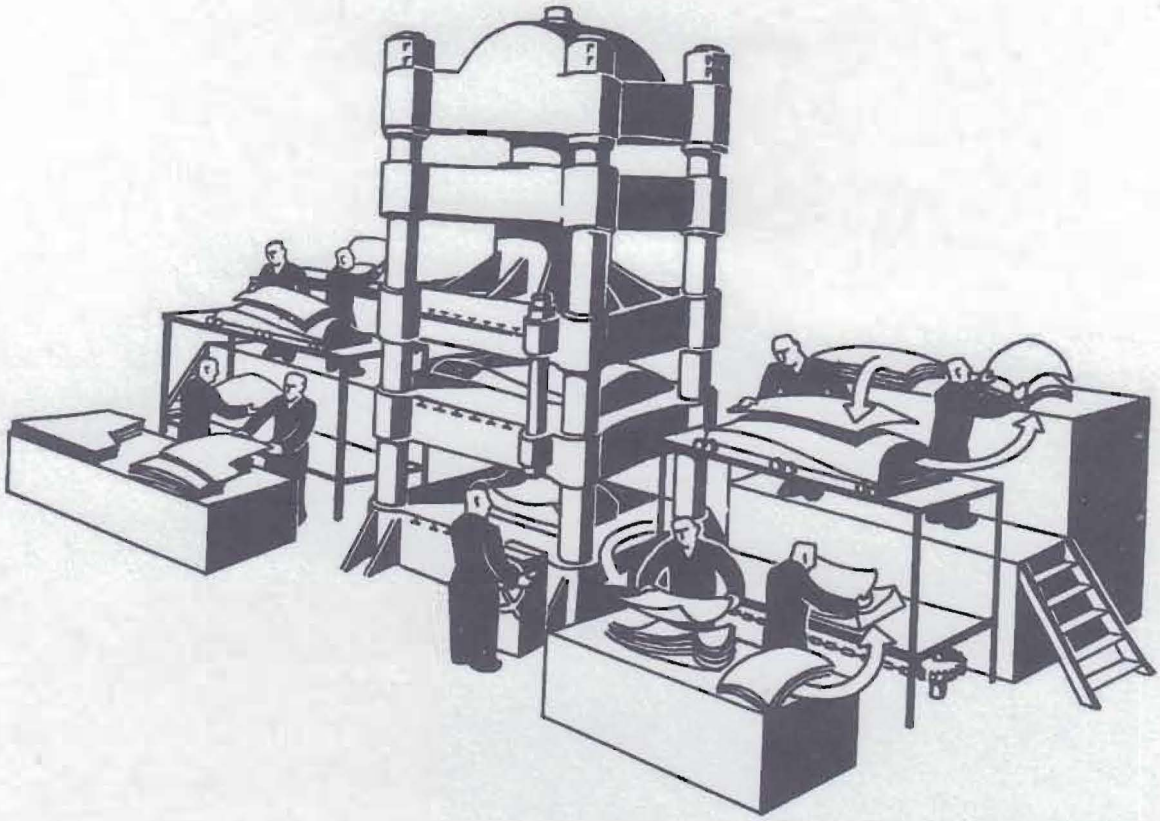


Bild 1.19: Bedienungsschema einer Zwei-Etagen-Gummipresse

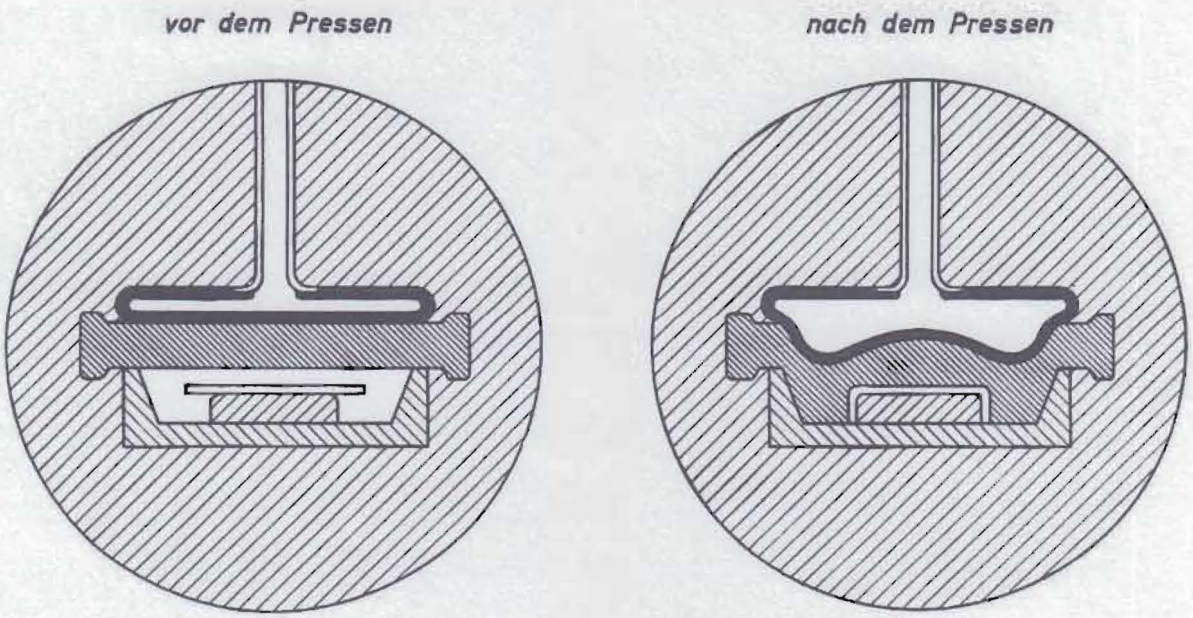


Bild 1.20: Hydraulisches Gummipressen

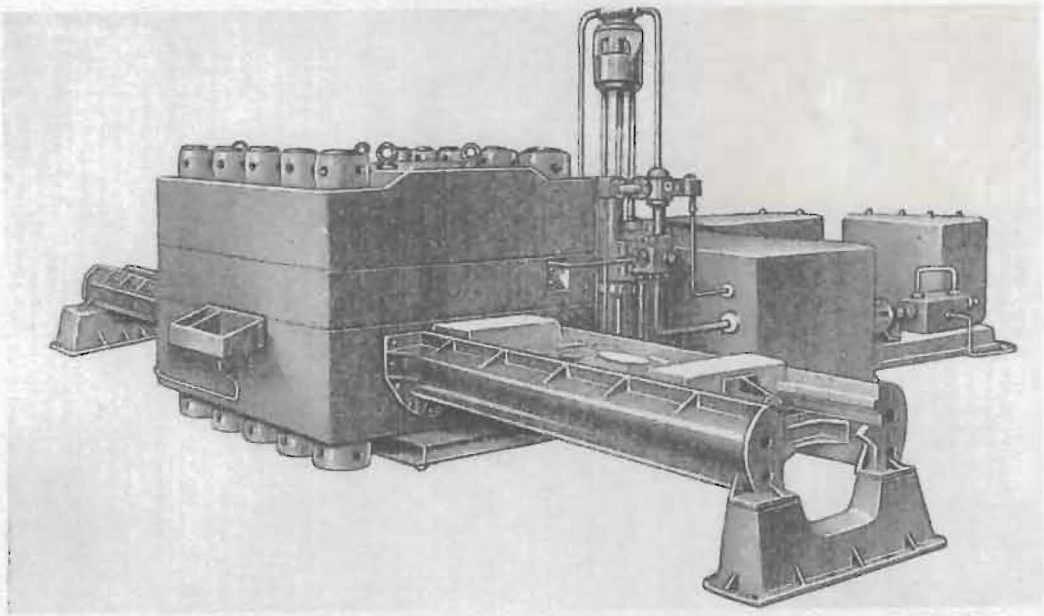


Bild 1.21: Wasserpresse mit beidseitiger Bedienanlage

Als Beispiel für die Möglichkeit weiterer Entwicklungen auf dem Gebiet des Reckwalzens soll im Bild 1.22 gezeigt werden, wie eventuell durch Ausbau dieses Verfahrens auch große, flächige Teile hergestellt werden können. Bild 1.23 zeigt dieses Verfahren, angewendet auf die Herstellung von Turbinenschaufeln.

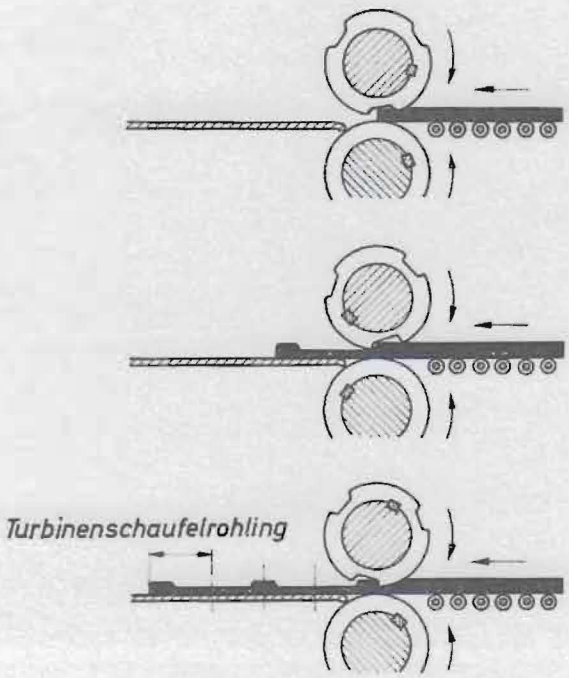


Bild 1.22: Durchlauf-Walzpressen von Profilen

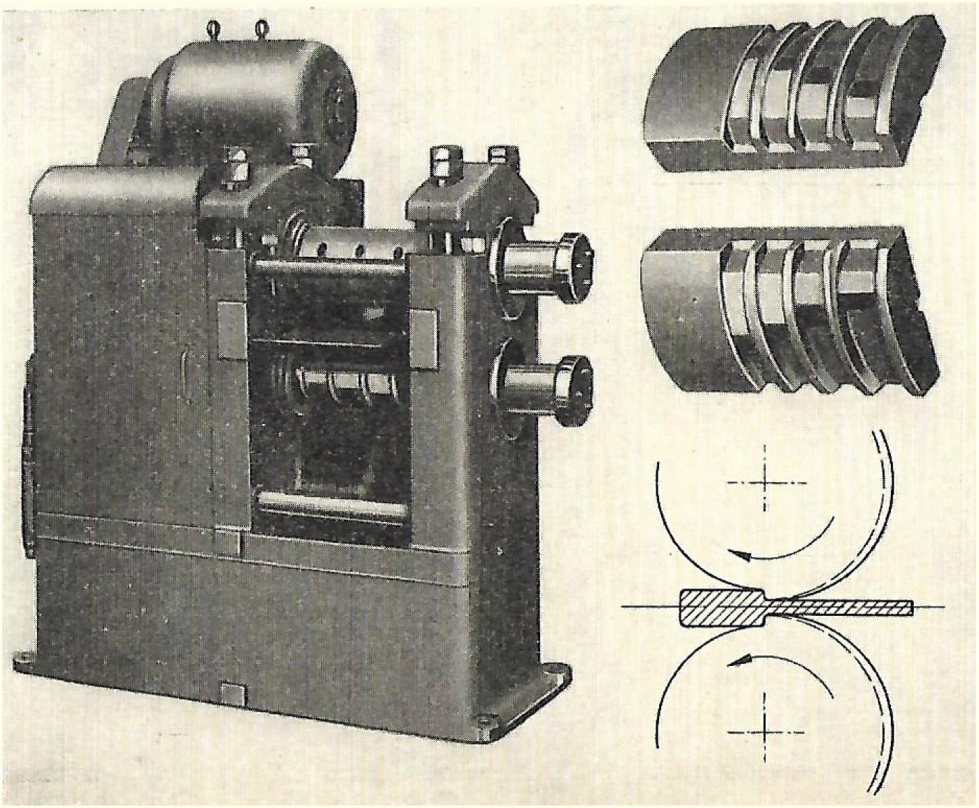


Bild 1.23: Walzschmieden von Turbinenschaufeln

1.3 Verbindungsprobleme

Die Verbindungsprobleme des Flugzeugbaus (Bild 1.24) zeigen auf dem Gebiet des Nietens ein ständiges Fortschreiten der Mechanisierung, den Übergang zum Pressen, soweit es die Zugänglichkeit gestattet, die Verbesserung der Außennietung zur Glattnietung und die Weiterentwicklung der Dichtnietung. Da der Herstellung der Verbindungspunkte je Zeiteinheit eine Grenze durch die Mechanik gesetzt ist, wird versucht, die Leistung durch gleichzeitiges Nieten mehrerer Verbindungen zu erhöhen.

Besondere Entwicklungen auf dem Gebiet der Nietung kann die Anwendung hoher Drücke bringen. Im Bild 1.25 ist das Schema eines Druckübersetzers gezeigt, der es ermöglicht, die Anlagen und die Werkzeuge wesentlich zu verkleinern. Die Entwicklung der Nietautomaten mit Mehrfachnietung geht von dem Portal aus, mit dem vier Reihen gleichzeitig geschlagen wurden (Bild 1.26). Das Ausnieten großer gewölbter Flächen unter einem Portal erfordert besondere Einrichtungen zur richtigen Lagerung unter dem Nietpunkt (Bild 1.27).

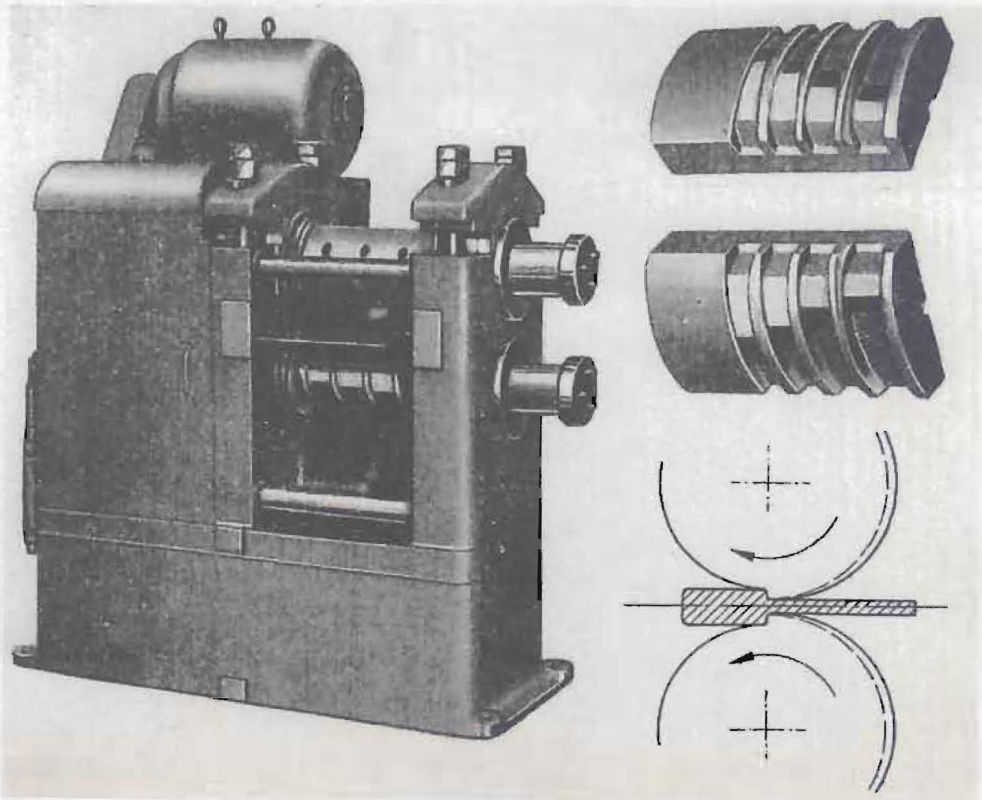


Bild 1.23: Walzschmieden von Turbinenschaufeln

1.3 Verbindungsprobleme

Die Verbindungsprobleme des Flugzeugbaus (Bild 1.24) zeigen auf dem Gebiet des Nietens ein ständiges Fortschreiten der Mechanisierung, den Übergang zum Pressen, soweit es die Zugänglichkeit gestattet, die Verbesserung der Außennietung zur Glattnietung und die Weiterentwicklung der Dichtnietung. Da der Herstellung der Verbindungspunkte je Zeiteinheit eine Grenze durch die Mechanik gesetzt ist, wird versucht, die Leistung durch gleichzeitiges Nieten mehrerer Verbindungen zu erhöhen.

Besondere Entwicklungen auf dem Gebiet der Nietung kann die Anwendung hoher Drücke bringen. Im Bild 1.25 ist das Schema eines Druckübersetzers gezeigt, der es ermöglicht, die Anlagen und die Werkzeuge wesentlich zu verkleinern. Die Entwicklung der Nietautomaten mit Mehrfachnietung geht von dem Portal aus, mit dem vier Reihen gleichzeitig geschlagen wurden (Bild 1.26). Das Ausnieten großer gewölbter Flächen unter einem Portal erfordert besondere Einrichtungen zur richtigen Lagerung unter dem Nietpunkt (Bild 1.27).

Fertigungsaufgaben	Fertigungsbeispiele	Fertigungsprobleme
Nietverbindungen Mechanisierung des Nietens Mehrfachnietung in Reihen und Komplexen Pressen statt Schlagen (geräuscharm) Glattnietung Dichtnietung	Halb-Vollautomaten Bügel und Portale genaue Oberfläche Dichtungseinlage I II Komplexe	Hochdrucknietung mit Druckübersetzung Vielfachnietung mit automatischer Nietzuführung und Ausrichtung des Werkstückes
Schweißverbindungen grundsätzlich müssen Nähte und Punkte die Festigkeit der zu verb. Teile erreichen Gasschmelzschweißen und andere moderne Verfahren an den Leichtbau anpassen Widerstandsschweißen (Punkt- und Naht-) für hohe Qualität mit automatischer Steuerung Vielpunkt-Schweißen Hochfrequenz-Schweißung	Argon und andere Schutzgase Unterpulverschweißen mit Programmsteuerung des Druckes und des Stromes	Zugänglichkeit große Maschinenleistung automatische Steuerung
Klebeverbindungen Voraussetzung: geeigneter Klebstoff Grenzen der Klebeverbindung: Unterbringung der Kräfte in Materialdicke und Nahtbreite mechanisches Vorrichten der Klebenaht mechanisches Aufbringen des Klebstoffes Druck- und Heizeinrichtungen	l d l l l d Aufnahme großer Kräfte	Anfräsen Reinigen Auftragen Pressen große Fräsmaschinen Reinigungsanlagen Auftragmaschinen Preßeinrichtung aus Normalelementen mit Heizung Gummischläuche nur bei niedrigen Temperaturen

Bild 1.24: Verbindungsprobleme (Schema)

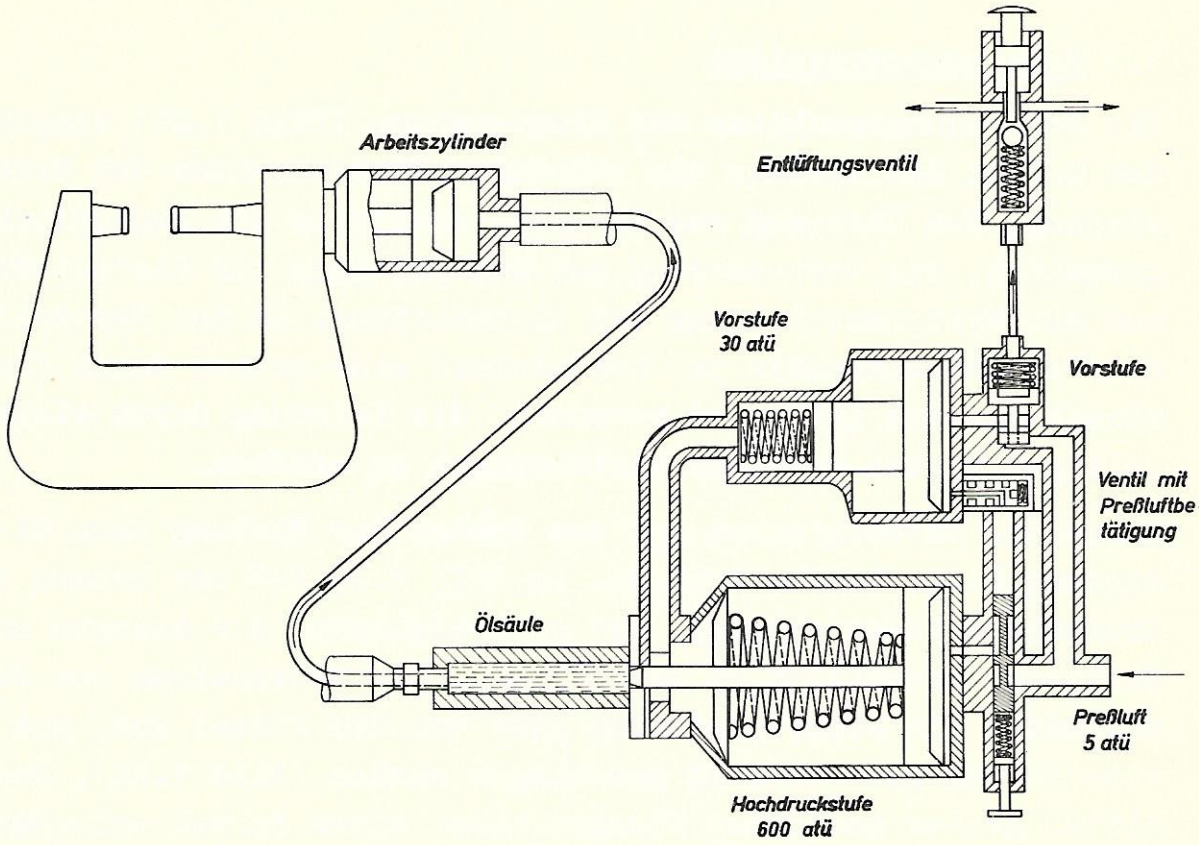
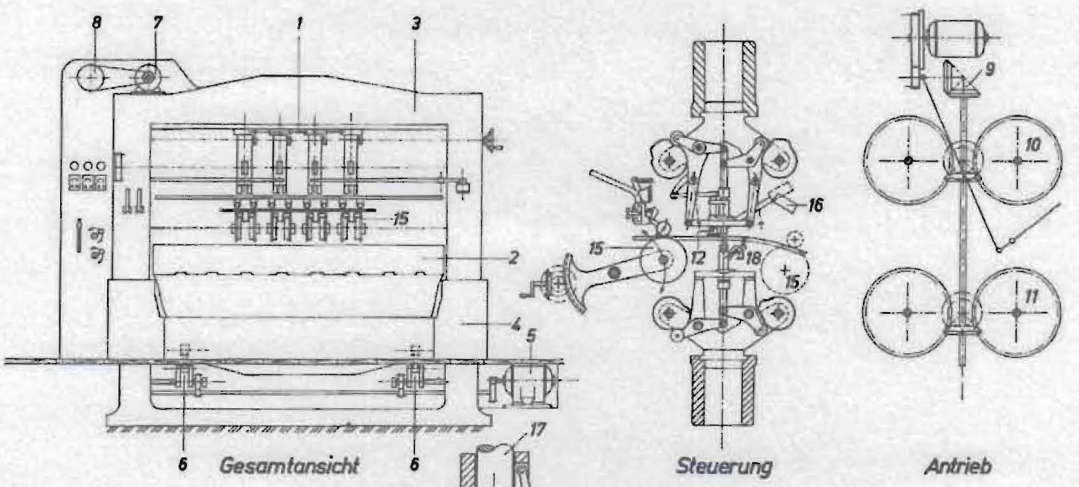


Bild 1.25: Zweistufiger, hydraulischer Druckübersetzer



1, 2 } Nietautomaten
3 Maschinenständer
4 Querbalken (heb- und senkbar)
5 Motor
6 Kurbeln (oberer Totpunkt = Arbeitsstellung)
7 Motor
8 Vorgelege
9 senkrechte Kegelradwelle

10, 11 } Nockenwellen
12 Niederhalter
13 Außenhülse des Unterwerkzeugs
14 Stauchstößel
15 Leitrollen
16 Nietzuführung
17 Eindrückstößel
18 Kontaktstifte (autom. Abschaltung, wenn ein Niet ausgeblieben)

Bild 1.26: Automatisches Vierreihen-Nietportal

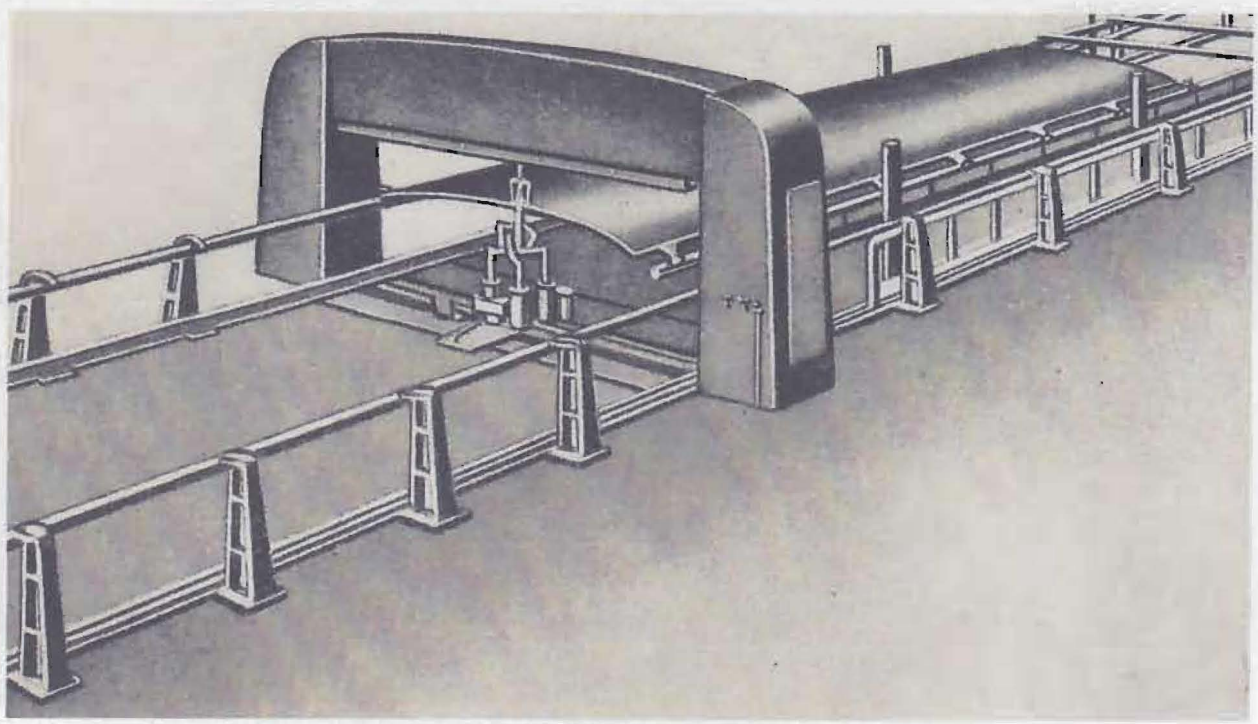


Bild 1.27: Nietportal mit automatischer Schwenkeinrichtung

Auf dem Gebiet des Schweißens werden laufend die Schweißverfahren anderer Industriezweige dem Leichtbau und Leichtmetallbau mit dem Ziel angepaßt, die Festigkeit der Schweißverbindung der Werkstoffestigkeit anzugleichen, um Zusatzverstärkungen und Gewicht einzusparen.

Einer Sonderentwicklung unterliegen vor allem die Widerstandsschweißverfahren für Punkte und Nähte. Die Qualität der Verbindung wird weiter durch Verbesserung der Steuerung von Druck und Strom in Höhe und Dauer gesteigert. Es bleibt zu untersuchen, ob die Anwendung höherer Frequenzen Vorteile bringen kann. Im Bereich der Widerstandsschweißung selbst sind Maschinen mit immer größerer elektrischer Leistung in der Entwicklung. Eine Steigerung des Fertigungsdurchsatzes ist auch hier nur möglich, wenn man zur gleichzeitigen Herstellung mehrerer Reihen (Bild 1.28) kommt oder gleichzeitig viele Punkte schweißt, wie es die Versuchsanlage des Bildes 1.29 zeigt.

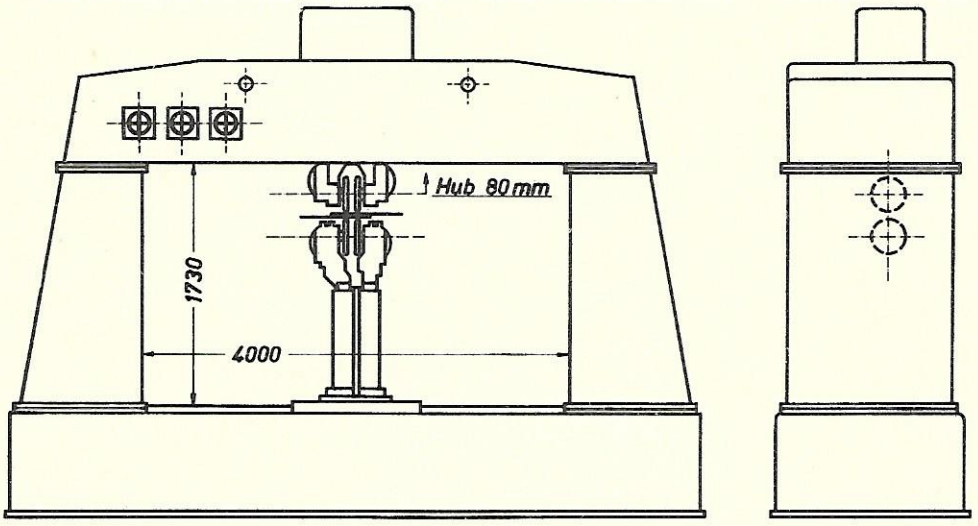


Bild 1.28: Mehrreihen-Schweißportal

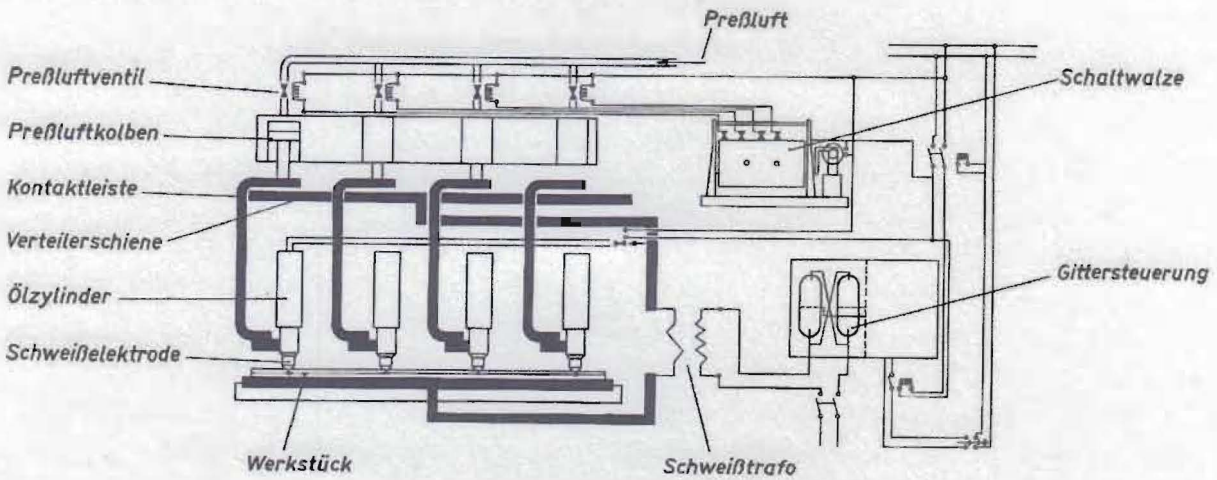


Bild 1.29: Steuerschema der Mehrpunktschweißung

Das Kleben von Metallen ist z.Z. noch eine Frage der Dauerfestigkeit des Klebstoffs. Auch müssen die Grenzen der Anwendung dieses Verfahrens in bezug auf die Kraftdurchleitung bei schmalen Verbindungsflächen, z.B. bei dicken Profilen, noch festgelegt werden. An besonderen Anlagen werden u.a. erforderlich: Fräseinrichtungen zum Anschärfen (Schäften), Reinigungs- und Auftrags-Einrichtungen, Preß- und Heizanlagen.

Die fertigungstechnischen Probleme des Klebens sind der Druckansatz und die etwa nötige Erwärmung. Die Bilder 1.30, 1.31, 1.32 und 1.33 zeigen Beispiele für die praktische Anwendung dieses Verfahrens.

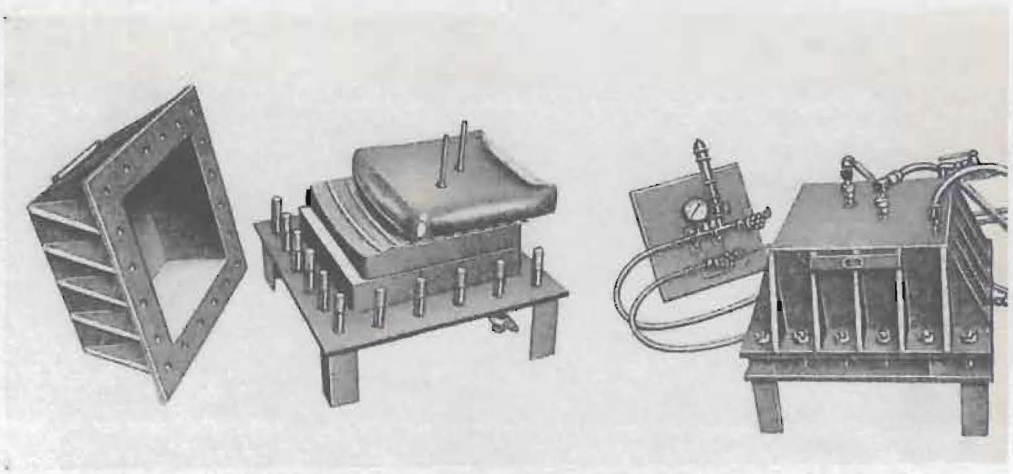


Bild 1.30: Versuchseinrichtungen zum Metall-Heißkleben

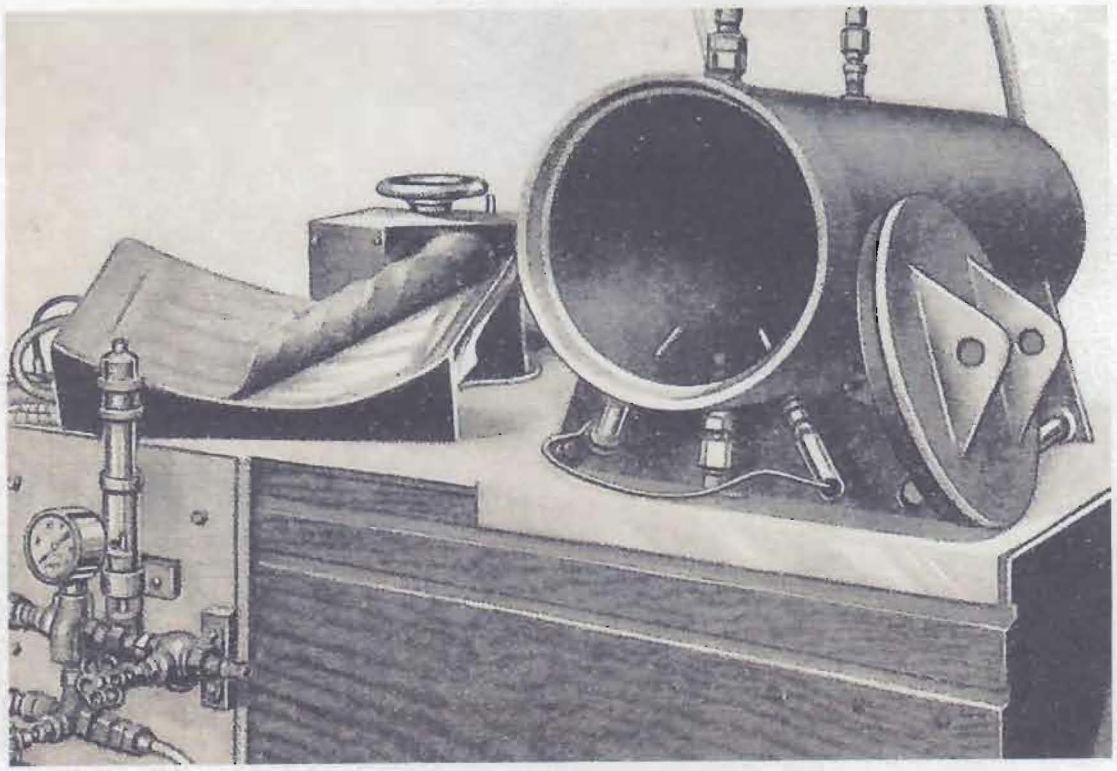


Bild 1.31: Kleiner Autoklav zum Heißkleben

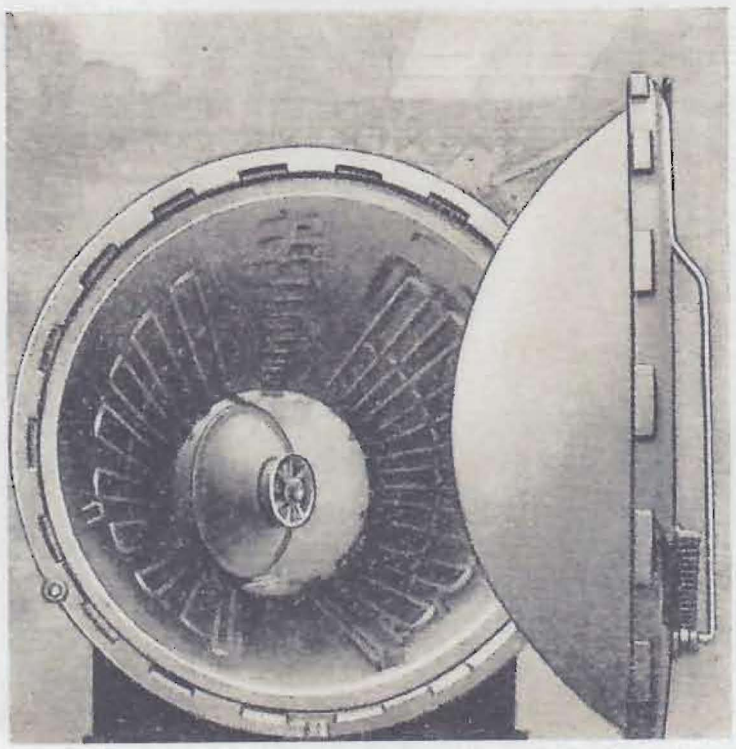


Bild 1.32: Autoklav zum Heißkleben

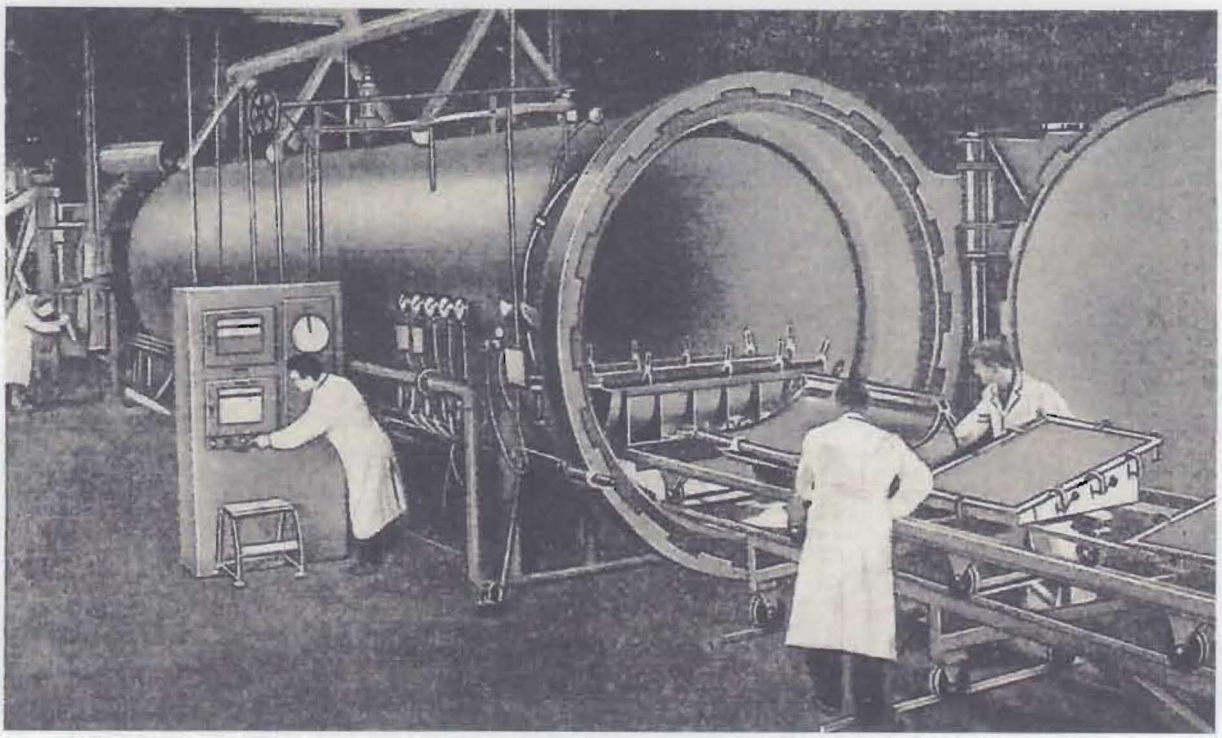


Bild 1.33: Bedienungseinrichtung eines Autoklaven zum Heißkleben

1.4 Integralplatten - Fertigungsmöglichkeiten und -probleme

Von den aufgeführten Fertigungsproblemen steht z.Z. die Herstellung der großen gewölbten und konischen Platten im Vordergrund.

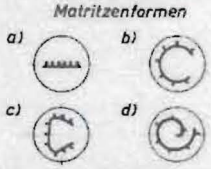
①Aus dem Vollen fräsen gewölbte Platten vorbiegen oder kopierfräsen	a) Dicke Blechplatten b) Konische Blechplatten angeliefert	Arbeitsgang: konisch fräsen, Rippen fräsen Arbeitsgang: nur Rippen ausfräsen
②Aus dem Vollen ätzen Herstellung gewölbter Platten bereitet keine Schwierigkeiten	a) Dicke Blechplatten b) Konisch gewalzte Platten	Arbeitsgang: konisch vorätzen, Rippen einätzen Arbeitsgang: nur Rippen einätzen
③Strangpressen Breite Platten schwierig herzustellen, Größe des Rezipienten entscheidend	Es lassen sich keine Querrippen herstellen, konisches Strangpressen ist möglich, aber schwierig, (Starrheit in der Matrize) a) Ebene oder flachgewölbte Platten (schmale Form) b) Rohrförmig gepreßt (Aufbiegen schwierig - Biegemoment in Rippennähe hindert) c) Mit wenigen Ecken gepreßt (geringe Aufbiege-Schwierigkeiten) d) Spiralförmig gepreßt (es treten ähnliche Schwierigkeiten wie bei den rohrförmig gepreßten Platten auf)	Matritzenformen 
④Gepreßte Platten Mammut-Pressen mit 10-15000 t/m² Druck erforderlich	a) Ohne Nacharbeit fertig (Genaupressen) b) Mit geringer Nacharbeit (fertig fräsen) c) Mit geringer Nacharbeit (fertig ätzen)	große Ätz- und Spülbäder nötig

Bild 1.34: Möglichkeiten und Probleme der Herstellung von Integralplatten

Zur abschließenden Übersicht sollen die Fertigungsmöglichkeiten hier kurz zusammengefaßt werden. Es ist Aufgabe der Technologie festzustellen, welches Verfahren sich jeweils lohnt. In Rechnung zu setzen sind hierbei die erforderliche Investition, der Materialaufwand und der unmittelbare Fertigungsaufwand.

1. Am nächsten liegt das F r ä s e n aus dem V o l l e n . Es kann aus gleich dicken oder konisch vorgewalzten Platten erfolgen. Im letzteren Fall wird schon eine erhebliche Einsparung an Werkstoff und Lohn möglich. Ein Formen nach dem Ausfräsen der Verrippung wird schwierig, weil die Biegung an den Rippenansätzen nach verschiedenen Momenten verläuft. Besser wird es sein, nach dem Vorbiegen zu fräsen, also Kopierverfahren anzuwenden. Trotzdem ist mit Verwerfen und Richtarbeit zu rechnen.

2. Das Ä t z e n aus dem V o l l m a t e r i a l scheint nach den vorliegenden Versuchen durchaus möglich zu sein. Gewölbte und konische Formen sind herstellbar. Die Anlagekosten sind zu prüfen. Der Materialverschleiß bleibt so groß wie beim Fräsen, auch wenn mit konisch gewalztem Vormaterial verglichen wird. Es ist noch nicht ganz klar, mit welcher Genauigkeit eine komplizierte Verrippung hergestellt werden kann. Voraussichtlich ist das Verfahren nicht allgemein anwendbar, kann aber zu einer starken Entlastung der Zerspanungsmaschinen führen.

3. Das S t r a n g p r e s s e n von b r e i t e n P l a t t e n setzt sehr große Rezipienten und Matrizen, also auch sehr große Pressenleistungen voraus. Um genügend breite Platten zu erhalten, wird ein Krümmen oder Falten der Platten nach entsprechend gebauten Matrizen notwendig sein. Damit ergibt sich wieder das Aufbiegen des vorgepreßten Profils mit seinen zuvor erwähnten Schwierigkeiten. Die Herstellung konischer Profile erscheint möglich, kompliziert aber die Preßverfahren sehr. Eine Querverrippung kann nicht hergestellt werden.

4. P r e ß v e r f a h r e n für k o n i s c h e und v e r r i p p t e P l a t t e n erfordern riesige Pressenleistungen, die sich nur lohnen, wenn solche Pressen auch

für Großteile anderer Industriezweige eingesetzt werden können. Als Pressenleistung müssen etwa 10 000 bis 15 000 t je Quadratmeter Preßteil angesetzt werden. Es ist fraglich, ob immer die erforderliche Genauigkeit herausgepreßt werden kann. Mit geringer Nacharbeit durch Fräsen oder vielleicht auch Ätzen wird immer zu rechnen sein.

Aus den vorhergehenden Überlegungen geht hervor, daß keines der genannten Verfahren allein alle Forderungen erfüllen kann. Eine geeignete Kombination mehrerer Verfahren wird also nötig sein.

Abschließend soll noch etwas über die Herstellung und den Aufbau großer Pressen gesagt werden.

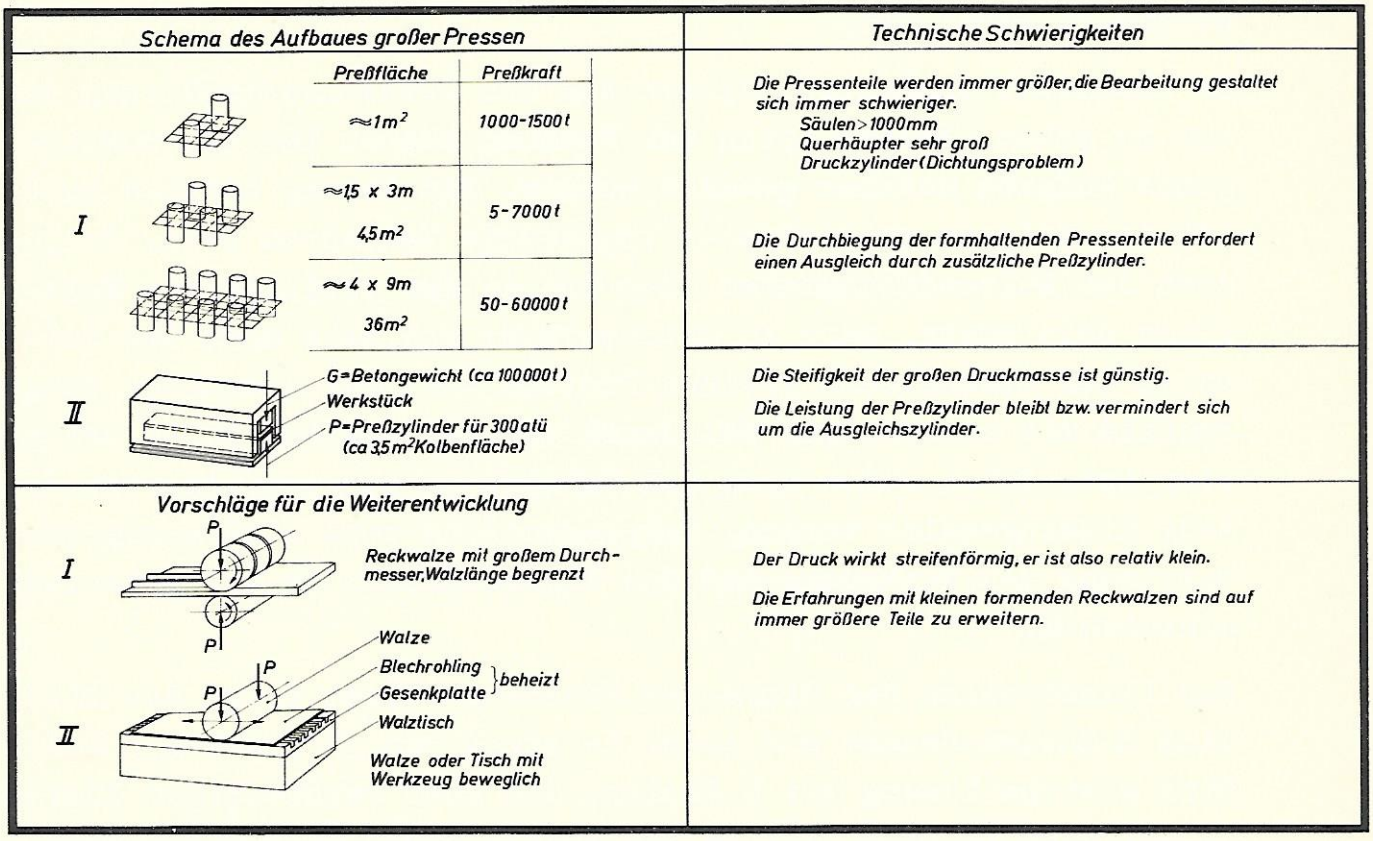


Bild 1.35: Pressen großer Integralplatten, Aufbau großer Pressen

Bisher sind Pressen mit Leistungen unter 100 000 t hergestellt worden. Schon bei Pressen mit Leistungen von etwa 60 000 t bis 70 000 t entstehen große Herstellungsschwierigkeiten für die großen Elemente solcher Pressen. Sie haben Tischgrößen bis etwa 4 x 13 m und sind insgesamt bis zu 35 m hoch gebaut worden. Die Säulen solcher Pressen haben einen Durchmesser von mehr als einem Meter, sind zwischen 20 und 30 m lang und wiegen 150 bis 300 t.

Derartige Elemente erfordern zu ihrer Herstellung riesige Werkzeugmaschinen. Bei einer weiteren Erhöhung der Preßkraft müssen neue Wege der Pressengestaltung beschritten werden. Mit einer Vermehrung der Säulen allein kann das Ziel nicht erreicht werden. Man ist deshalb dazu übergegangen, den Preßdruck durch Gewicht zu erzeugen. Der Überbau des Preßtisches ist in diesem Fall als riesiger Betonklotz ausgeführt, der lose auf dem Fundament steht und durch den von unten wirkenden hydraulischen Druck über Werkzeugtisch und Werkzeug angehoben wird. Bei 300 atü hydraulischem Druck haben die von unten her auf das Werkzeug wirkenden Kolben etwa eine Fläche von 3,5 m^2. Infolge der Starrheit des oberen Betonpressenteils werden Durchbiegungen der Werkzeuge vermieden.

Es erscheint unmöglich, diesen Weg der Pressenvergrößerung weiter zu gehen. Andere Arten der Formung müssen für die vorliegende Aufgabe nutzbar gemacht werden. Ein Ausweg könnten nach Art des Walzens schrittweise vorgehende Verfahren sein. Da jedoch der Walzendurchmesser eine Grenze der profilierten Walzlänge sein müßte, wäre zu untersuchen, wie weit nach dem Beispiel des Reckwalzens kleiner Profile auch das Auswalzen langer Profile mit einseitigem Walzdruck von der glatten Seite her möglich ist. Dabei müßte also das Walzgut in ein profiliertes Werkzeug hineingewalzt werden. Gegebenenfalls wäre eine genügende Beheizung des Werkzeugs und des Walzmaterials in die Apparatur einzubauen.

Zur Illustration der Größe des Pressenproblems zeigt das Bild 1.36 eine 8-Säulen-Presse mit einer Leistung von 31 500 t als Modell. Eine gleiche Lösung mit 8 Säulen, die aber rechteckigen Querschnitt haben, wird im Bild 1.37 an dem Modell einer 68 000-t-Presse dargelegt. Schließlich ist im Bild 1.38 das Modell einer 68 000-t - Presse in Stahlbetonausführung nach Entwurf und Berechnung der Firma Austin zu sehen.

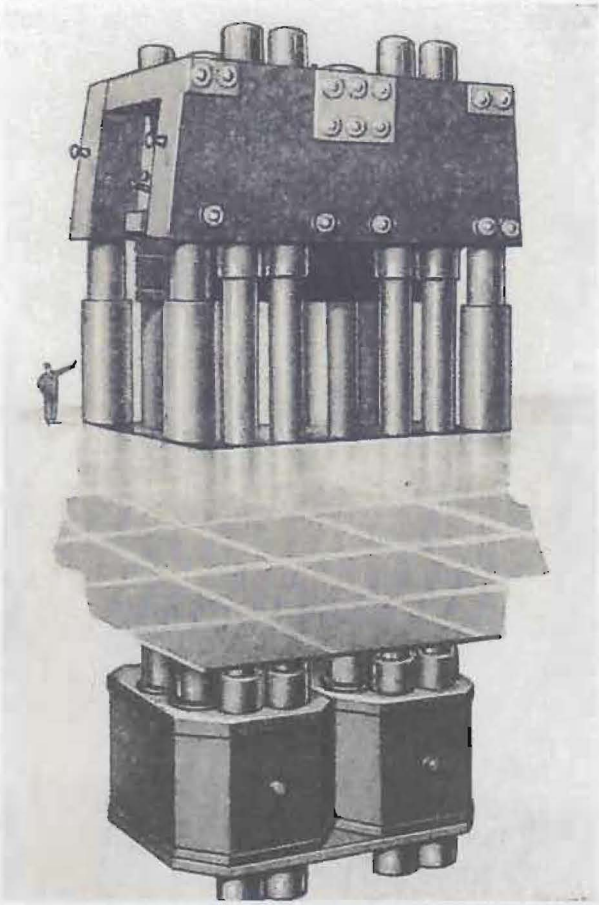


Bild 1.36: Modell einer 31 500-t-Presse

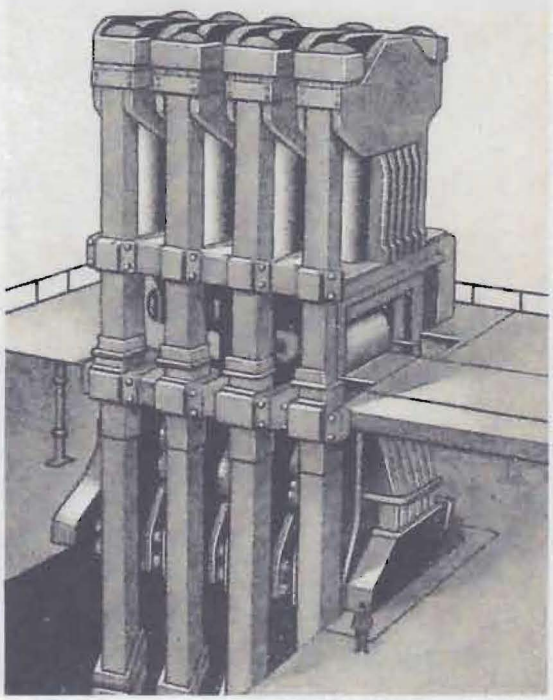


Bild 1.37: Modell einer hydraulischen 68 000-t-Presse

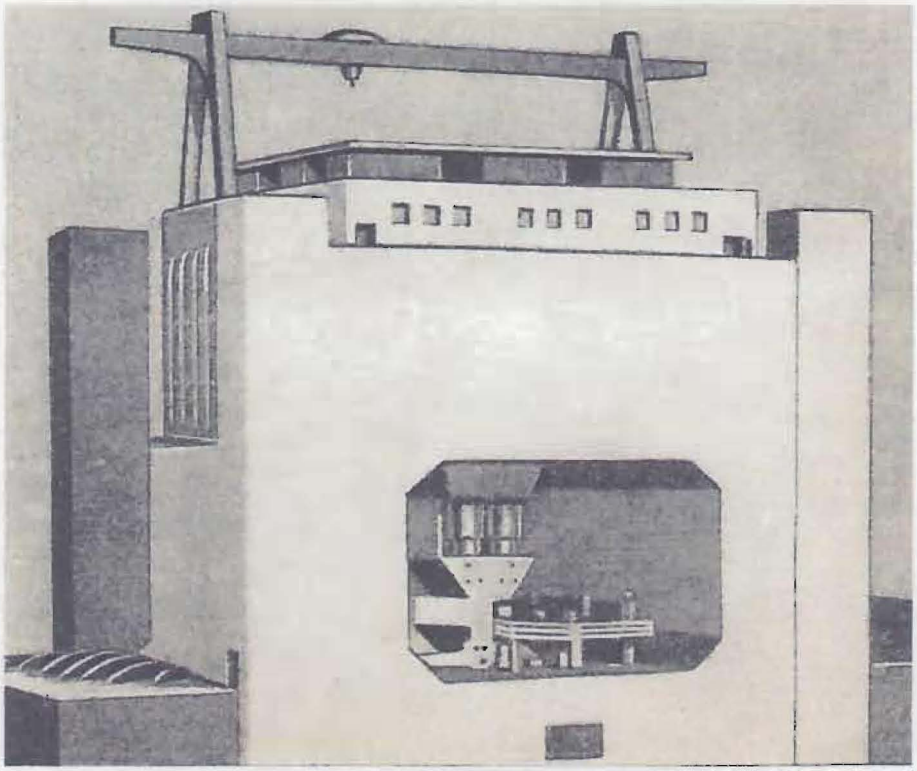


Bild 1.38: Modell einer hydraulischen 68 000-t-Presse mit Stahlbetonrahmen

1.5 Zusammenfassung

Ein Überblick über die Forderungen der Flugzeugentwicklung an die Technologie zeigt, daß die Probleme des s p a n e n d e n F o r m e n s in der Größe und Kompliziertheit der im Kopierverfahren herzustellenden insbesondere plattenförmigen Elemente bestehen. An sich bekannte Maschinen und Verfahren müssen den Erfordernissen des Leichtbaus angepaßt werden. Das Abtragen durch Ätzverfahren kann voraussichtlich, insbesondere bei gekrümmten und konischen Teilen, die Zerspanungsmaschinen entlasten. Für die spanende Formung hochfester Teile ist die Anpassung der Erosiv- und Ultraschallverfahren in Bearbeitung. Auch die hochfesten Genauteile des Triebwerkbaus erfordern eine Spezialisierung im Prinzip bekannter Maschinen, insbesondere zur Herstellung komplizierter Massenteile (Schaufeln für Turbinen).

Die Probleme der s p a n l o s e n F o r m u n g entstehen aus den Eigenheiten der Leichtbaustoffe, der Größe und Kompliziertheit der Bauteile, also insbesondere aus der Größe der erforderlichen Maschineneinheiten. Die relativ kleine Stückzahl

großer Teile ist hierbei eine Werkzeugfrage. Durch die Genauformung kann sowohl für die großen plattenförmigen Elemente, wie auch für die Genauteile des Triebwerks die Spanungsarbeit verringert werden.

Die W ä r m e b e h a n d l u n g s a n l a g e n für große Leichtmetallteile wie auch für Stahlteile erfordern die Aufstellung besonders großer Ofenanlagen, die im engen Temperaturbereichen arbeiten können.

Die V e r b i n d u n g s p r o b l e m e des Nietens und Schweißens drängen zur weiteren Automatisierung. Vor allem sind hier Festigkeit, Dichtheit und Glätte der Außenhaut wichtige Entwicklungsfaktoren. Das Kleben von Metallen ist im Hinblick auf Dauerhaltbarkeit der Klebstoffe noch in Entwicklung. Über die erforderlichen Einrichtungen und Maschinen bezüglich ihrer Eigenarten besteht noch keine Klarheit.

Der E i n f l u ß n e u e r B a u s t o f f e , insbesondere von Titan und leichten Kunststoffen, ist z.Z. in seiner Tragweite noch nicht genau zu übersehen. Es ist aber anzunehmen, daß eine Anpassung der Maschinen und Einrichtungen in einem gewissen Umfang erfolgen muß.

Für die Gesamtindustrie wird der Flugzeugbau mit seinen Baustoffen und mit den Prinzipien des Leichtbaus auch in Zukunft befruchtend und beispielgebend sein müssen und an den Werkzeugmaschinenbau immer neue Anforderungen stellen.

2 Entwicklungstendenzen im Flugzeugbau und ihre Auswirkung auf Bauweise, Baustoffe und Arbeitsverfahren

2.1 Übersicht über die Entwicklung

Ein Rückblick auf die Entwicklung des Flugzeugbaus in den letzten fünfzig Jahren läßt erkennen, daß innerhalb der allgemeinen Entwicklungstendenzen in bezug auf Fluggeschwindigkeit, Flughöhe und Größe der Flugkörper viele Einzelentwicklungen aus grundsätzlichen Anfängen heraus einen langen Entfaltungsweg durchlaufen müssen, bevor sie eine breitere, erkennbare Anwendung finden. Ein Versuch, über die nächsten weiteren Entwicklungsschritte auf dem Gebiet der Fertigung einen annähernden Aufschluß zu gewinnen, wird zweckmäßig von dieser Feststellung ausgehen und die gegenwärtig erkennbaren Einzelentwicklungen zur Grundlage für einen Blick in die Zukunft nehmen.

So wird z.B. die a b g e s t ü t z t e oder a u f g e l ö s t e A u ß e n w a n d schon von den ersten seit 5 0 Jahren laufenden Patenten erfaßt. Die Entwicklung der Baustoffe und Arbeitsverfahren in diesem Zeitraum hat verschiedene Möglichkeiten eingeführt. Gegenwärtig wird im Leichtbau immer noch an f e r t i g u n g s r e i f e n Lösungen gearbeitet, die den Entwicklungsweg für die n ä c h s t e n Jahre weisen.

Ebenso ist das Problem der exakten k o n i s c h e n oder k e i l i g e n B a u e l e m e n t e in ständiger Weiterentwicklung. Es erfaßt sowohl die trägerartigen Innenelemente wie auch die verkleidende und tragende Außenhaut. Zur Zeit bildet sich in einem schon über zwei Jahrzehnte laufenden Vorgang die konisch-keilig gepreßte oder abtragend behandelte große Platte immer weiter heraus.

Zu den bereits seit Jahrzehnten betriebenen Entwicklungen gehört auf dem Gebiet der Fertigung u.a. das K o p i e r f r ä s e n . Gegenwärtig wird bei diesem Verfahren am Einsatz größter Maschineneinheiten gearbeitet.

Auch aus anderen Industriezweigen entlehnte Verfahren, wie das A b t r a g e n durch Ä t z e n , durchlaufen seit etwa zwei Jahrzehnten innerhalb der Flugzeugfertigung einen allgemein fördernden Entwicklungsweg.

Noch verschiedene andere langlaufende Entwicklungen ließen sich anführen, die der Flugzeugbau zum Nutzen des allgemeinen Leichtbaus und für andere Industrien durchbilden muß, um seine Objekte weiter zu gestalten.

Die in die Zukunft weisenden Tendenzen des Flugzeugbaus werden insbesondere durch folgende Faktoren beeinflußt (Bild 2.1, Spalte 1):

Steigerung der Fluggeschwindigkeit,
Flug in großen Höhen,
Einsparung von Gewicht zum Vorteil der Nutzlast,
Form und Größe der Flugzeuge,
(Einfluß auf Stückzahl und Fertigung ist zu beachten),
neuartige Triebwerke,
(PTL, TL, Rakete, Atomkraft),
vollkommenere Mechanisierung,
(Fahrgestell, Klappen, Hydraulik, Elektrik),
Ausrüstung mit vermehrten Bedienungs- und Sicherheitsinstrumenten, erhöhter Komfort.

Die Auswirkungen dieser Faktoren auf die Bauweise sind in Bild 2.1 in den Spalten 2, 3 und 4 dargelegt. Besonders zu beachten sind die Auswirkungen der ersten drei unter 1 genannten Punkte auf die Bauweise nämlich:

genaueste Formgebung, höchste Oberflächenglätte, hohe Oberflächentemperaturen, flache Formen für Trag- und Leitwerk, größere Wanddicken als beim Langsamflugzeug,

druckdichte Räume und Regelung der Innenatmosphäre sowie Vereisungsabwehr,

voll ausgenutzte Baustoffquerschnitte, also konische und keilige Innenteile und Außenhäute, hochfeste Baustoffe und Auflösung im Waben- und Stützstoffprinzip.

Auch die weiteren Punkte führen zu einer lebhaften Fortentwicklung in Richtung der Anwendung großer Einzel-Bauelemente, neuartige Elemente der Kraftleitung in den Anschlüssen und zur notwendigen Lösung hydraulischer und elektrischer Probleme.

Da sich zu einer in die Perspektive leitenden Übersicht eine systematische Betrachtung gut zu eignen scheint, soll nachfolgend die E n t w i c k l u n g im G r u n d s ä t z l i c h e n gesucht und angedeutet werden. Die bei der Betrachtung von Bauweise, Baustoff und Arbeitsverfahren in der Zusammenwirkung immer hervortretenden Gebiete Baustoff und Festigkeit, spanlose Formung, spanende Formung und Verbindungsverfahren

① Tendenzen der Entwicklung	② Auswirkung auf die Bauweise	③ Forderungen an die Baustoffentwicklung	④ Arbeitsverfahren unter dem Einfluß von ① bis ③
Steigerung der Fluggeschwindigkeit	genaueste Form, höchste Oberflächenglätte, flache Trag- und Leitwerksformen (Wanddicke und innerer Aufbau), hohe Oberflächentemperatur	glatte Oberflächen, Warmfestigkeit $>300^{\circ}$ Celsius für Baustoffe, Klebstoffe, Überzüge	Walz-, Preß- oder Gußhaut glatt, Polierverfahren verbessern, (mechanisch, chemisch, Ultraschall)
Flug in großen Höhen	druckdichte Räume, Druckregelung, Sauerstoffregelung, Vereisungsabwehr	Dichtstoffe, Dichtverfahren, Kältebeständigkeit $<-60^{\circ}$ Celsius	Dichtbau durch: Nietung mit Einlage, innere Abdeckung mit Dichtstoff, Dichtklebung, Schweißnähte (Schmelz- und Widerstandsschweißung)
Einsparung von Gewicht zum Vorteil der Nutzlast	vollausgenutzte Querschnitte, Wabenbau, Stützstoffbau, konische (keilige) Rippen, konische (keilige) Beplankung, hochfeste Baustoffe	Reihe: Holz, Kunststoffe, Mg-Leg., Al-Leg., Titanleg., Fe-Leg. Zug-, Druck-, Beul-, Schwingungsfestigkeit, Homogenität (Legierungen), lunkerfrei, Faserlage (Recken, Pressen), Vergüten, für Bearbeitung erweichen, spannungsfreies Material	Einrichtungen und Verfahren für die Stützstoff-Bauweise aus Kunststoffen, Holz- oder Metallelementen; Schweiß- und Klebeverfahren
Formen und Größe der Flugzeuge, Einfluß auf die Stückzahlen	Teilbarkeit für Transport und Fertigung, große Teile (Platten), Verbindungsaufwand sparen; Großteilformung (gepreßt, gegossen) Schweißen, Kleben	hochwertiger Leichtguß, Preß- und Schmiedeteile, Strangpreßteile, Blechformteile - allgemein gute Formbarkeit, gute Zerspanungsmöglichkeit, chemisch Abtragen, Schweißung mit Werkstoff-Festigkeit	sauberer, dichter, hochfester Genauguß, konisches Strangpressen, Recken - Faserlagen schaffen, Großpressen $\approx$100 000 t. Abspanen, Abätzen, Glätten, Kopieren nach Modellen, Schablonen oder Steuerbändern, Richten, Polieren, Eloxieren; Bearbeitung hochfester Stoffe: Elektro-Erosion, Ultraschall Verbindungsverfahren: automatische und Vielfach-Nietung, Punkt- und Nahtschweißung, Schutzgasschweißung, automatisch Wärmebehandlung in speziellen Öfen: Glühen, Härten, Veredeln Bearbeitung in der Kältekammer, Prüfen: Ultraschall, Isotope, Röntgenprüfung
neue Antriebe (PTL - TL - Rakete - Atomkraft)	neue Formen; Elemente der Kraftleitung, Temperaturen, schädliche Strahlung, Betätigungselemente, Kraftstoff-Unterbringung	Genauguß, hochwarmfeste Baustoffe: Nimonik, Sinterstoffe, Keramik, Titan u.a.	
vollkommenere Mechanisierung Fahrgestell, Klappen, Hydraulik, Elektrik	Probleme konstruktiv lösen		
Ausrüstung, vermehrte Sicherheitsinstrumente, Komfort	Einbauprobleme der Konstruktion		

Bild 2.1: Die Tendenzen der Entwicklung im Flugzeugbau und ihre Auswirkung auf Bauweise, Baustoffe und Arbeitsverfahren

lassen bei systematischer Behandlung gewisse in die Zukunft weisende Richtungen am besten erkennen. Das geht bereits aus dem Aufbau des Bildes 2.1 hervor, das aus den Tendenzen der Entwicklung (Spalte 1) über die Bauweisen (Spalte 2) und Baustoffentwicklungen (Spalte 3) zu dem sich ergebenden Arbeitsverfahren (Spalte 4) leitet.

Vorauszuschicken ist die Feststellung, daß sich die Entwicklungstendenzen im Flugzeugbau auf die Bauweisen, also auf die Konstruktionsprinzipien auswirken. Dabei ist nach der augenblicklichen Situation zu erkennen, daß sich folgende Entwicklungsrichtungen immer mehr durchsetzen werden:

1. Einsparung von Gewicht durch immer leistungsfähigere Werkstoffe, wobei auch der strukturelle Aufbau in bestimmten Richtungen durch Walzen, Pressen, Recken und ähnliche Vorgänge bedeutsam ist;
2. immer konsequenter geforderte, keilige und konische Ausbildung der Elemente in Angleichung an die aufzunehmenden Kräfte;
3. Durchbildung der tragenden Wandelelemente zu im Zellen- oder Stützstoffbau aufgeschlossenen Leichtplatten oder Leichtschalen;
4. Verwendung großer Wand-Bauelemente bei druckdichten Räumen (Rumpfbau), um Undichtigkeiten einzuschränken und anderseits Verbindungsarbeit einzusparen; dieses Konstruktionsprinzip ist auch für Tragflächen gebräuchlich geworden;
5. genaue Außenformen, Oberflächenglätte und Oberflächentemperatur, die schon bei der Bauweise berücksichtigt werden müssen;
6. aus der Triebwerkentwicklung sich ergebende neue Formen, die sich für PTL, TL und Rakete einigermaßen erkennen lassen, aber für das Atomtriebwerk noch sehr unklar sind.

2.2 Baustoff und Festigkeit

Es ist bekannt, daß G e w i c h t und F e s t i g k e i t für die Baustoffe Kriterien für die Eignung zum Leichtbau sind. Eine systematische Zusammenstellung der gewachsenen, künstlichen und metallischen Baustoffe läßt deutlich erkennen, in welchen Grenzen die Forderungen des Leichtbaus erfüllt werden.

Trägt man die Zugfestigkeit σ_z über dem spezifischen Gewicht auf, so läßt sich aus dem Verhältnis σ_z/γ (= Reißlänge) feststellen, bei welchen Mindestfestigkeiten die Stoffe den Leichtbauforderungen genügen.

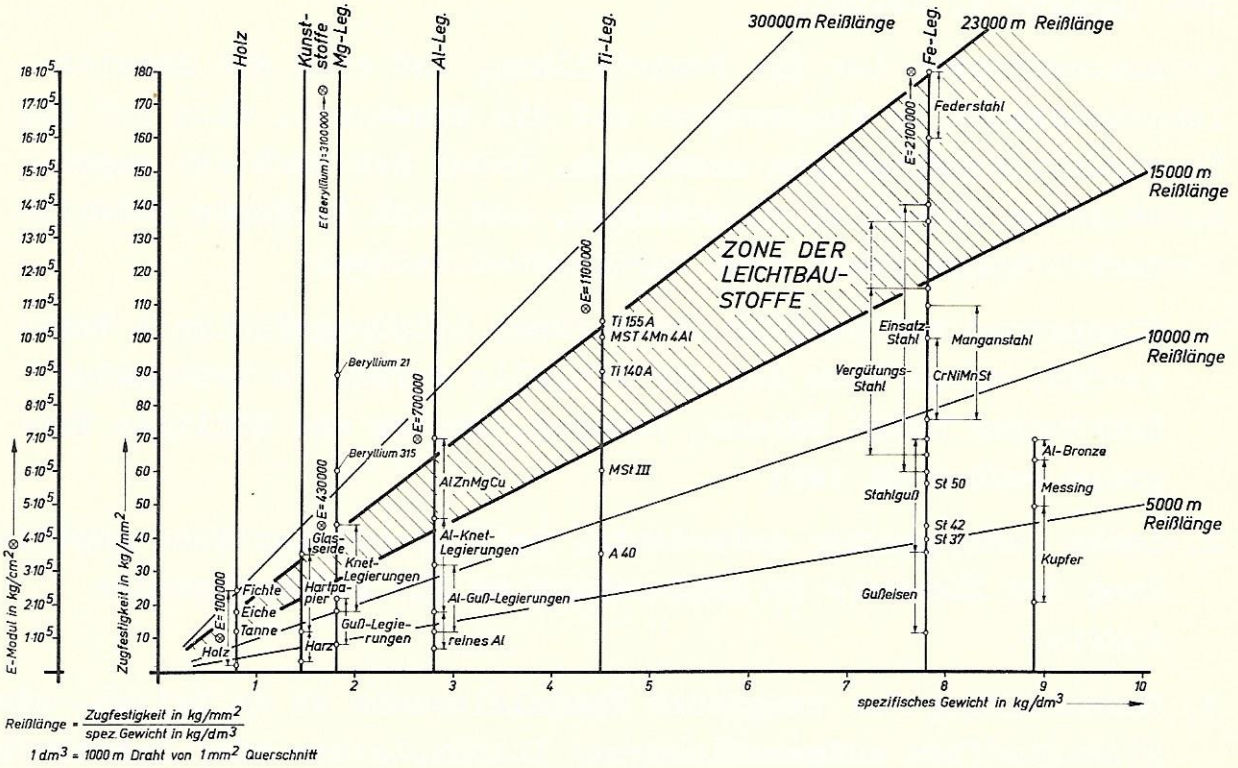


Bild 2.2: Die Reißlänge als Kriterium des Leichtbaus

Von den bekannten und viel angewandten Werkstoffen scheiden die Schwermetalle, wie zum Beispiel Kupfer und seine Legierungen, aus, weil sie sich nicht auf hohe Festigkeitswerte steigern lassen. Die Stahllegierungen werden im Bereich der höchsten Festigkeiten zu Leichtbaustoffen. Von den mittelschweren Werkstoffen ist in letzter Zeit das Titan in hochwertigen Legierungen im Leichtbau verwendbar geworden. Es ist bekannt, daß auch vom Aluminium in hochbeanspruchten Konstruktionen nur die hochwertigen Legierungen im eigentlichen Leichtbau Verwendung finden können. Weiter ist bekannt, daß der Flugzeugbau mit den gewachsenen Zellstoffen, mit dem Holz begann. Die etwas schwereren Kunststoffe, bei denen z.Z. die aus Harzen und hochwertigen Fasern gebildeten Stoffe im Leichtbau brauchbar geworden sind, bilden die Basis für eine sehr aussichtsreiche zukünftige Entwicklung. Die Metallreihe der Leichtbaustoffe beginnt mit den Magnesiumlegierungen und führt über Titan zum Stahl. Das

Beryllium mit gleichem spezifischem Gewichtswert wie Magnesium weist weit aus der Reihe fallende Festigkeiten auf, so daß es zunächst zur Verwendung im Leichtbau nur geeignet erscheint, wenn es gelingt, Legierungen zu schaffen, die seine unangenehmen Eigenschaften, z.B. leichte Entzündbarkeit, eliminieren.

Eine kritische Systematisierung der bekanntesten Werkstoffe kann, wie die Darstellung des Bildes 2.2 zeigt, im Zusammenwirken von Gewicht und Festigkeit eine bestimmte untere Grenze festlegen, unter der ein Werkstoff als Leichtbaustoff ausfällt, oder umgekehrt läßt sich auf diese Weise feststellen, welche Qualitäten und Festigkeiten einen Werkstoff zum Leichtbaustoff machen.

Um den Bereich der Leichtbaustoffe zu charakterisieren, sind im Bild 2.2 die Reißlängen von 5 bis 30 km eingezeichnet. Die Reißlänge ergibt sich aus der Beziehung:

$$\text{Reißlänge} = \frac{\text{Zugfestigkeit in kg/mm}^2}{\text{spez. Gewicht in kg/dm}^3}$$

$$= \frac{\text{kg} \cdot \text{dm}^3}{\text{mm}^2 \cdot \text{kg}}$$

$$= \frac{\cancel{\text{kg}} \cdot 1\,000\,000\ \text{mm}^3}{\cancel{\text{mm}^2} \cdot \cancel{\text{kg}}}$$

$$= 1\ \text{km}$$

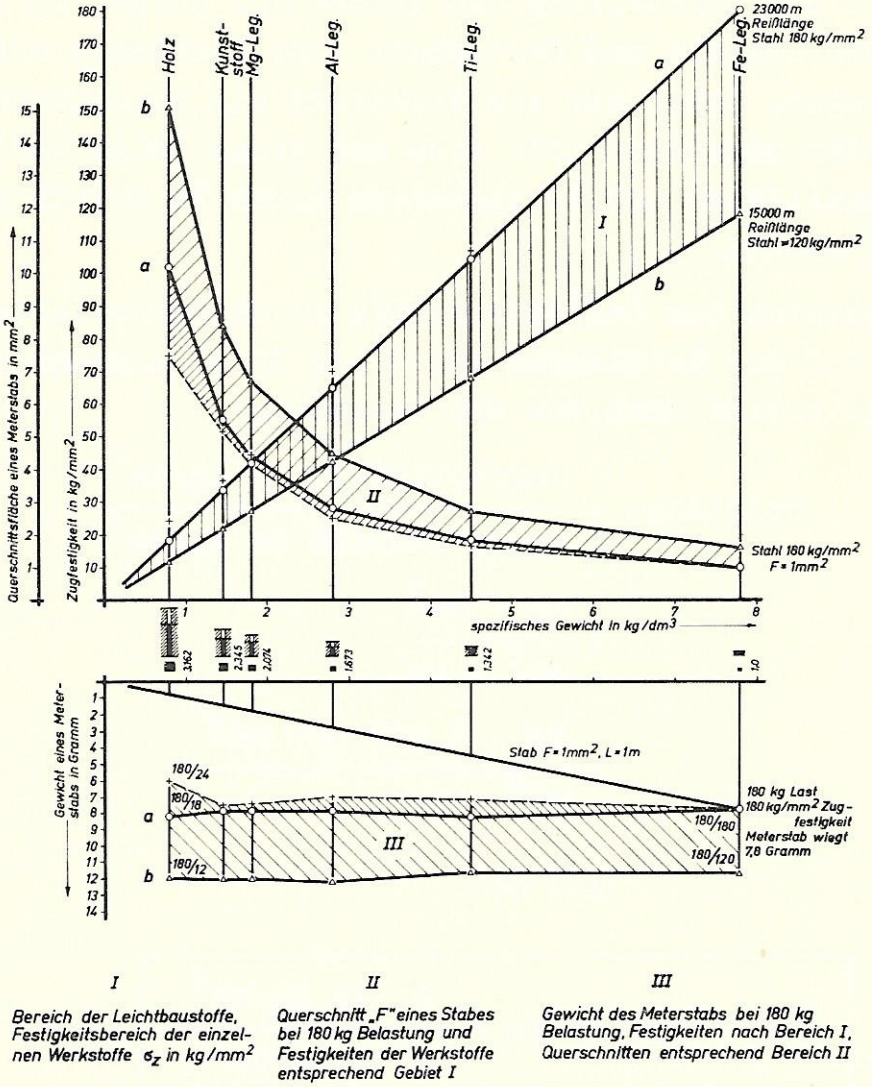
$$\boxed{\text{Reißlänge in km} = \frac{\sigma_z \text{ in kg/mm}^2}{\gamma \text{ in kg/dm}^3}}$$

Nach den allgemeinen Erfahrungen sind Werkstoffe im Leichtbau verwendbar, wenn sie mit ihren Qualitäten σ_z und γ über eine Reißlänge von 15 km kommen. Dabei ist ersichtlich, daß die bekannten Leichtbauwerkstoffe alle innerhalb der Zone zwischen den Reißlängen 15 bis 23 km oder darüber liegen.

Leitet man das Ergebnis dieser Feststellung weiter ab, so lassen sich die Kriterien des Leichtbaus noch verdeutlichen. In Bild 2.3 sind die Werte der hochwertigen Stahllegierungen zwischen den Reißlängen 15 und 23 km mit σ_z etwa 118 bis 180 kg/mm^2

als Ausgangspunkt benutzt worden. Die drei gestrichelten Flächen zwischen den aufeinander bezüglichen Kurven (a) und (b) kennzeichnen die Leichtbauverhältnisse der erfaßten Werkstoffe.

Die senkrecht schraffierte Fläche (I) kennzeichnet das Gebiet der Leichtbaustoffe zwischen den Reißlängen 15 und 23 km.



I — Bereich der Leichtbaustoffe, Festigkeitsbereich der einzelnen Werkstoffe σ_z in kg/mm²

II — Querschnitt „F" eines Stabes bei 180 kg Belastung und Festigkeiten der Werkstoffe entsprechend Gebiet I

III — Gewicht des Meterstabs bei 180 kg Belastung, Festigkeiten nach Bereich I, Querschnitten entsprechend Bereich II

Bild 2.3: Querschnitte von Zugstäben mit gleichem Gewicht bei 180 kg Zuglast

Die schräg schraffierte Fläche (II) zeigt den jeweils erforderlichen Querschnitt F eines Stabs bei 180 kg Belastung an. Es ist also die mit Stahl von 180 kg Festigkeit erreichbare Last für alle Werkstoffe mit geringerer Festigkeit angesetzt worden, d.h., es sind mit den anderen minderwertigeren Werkstoffen Querschnitte gebildet worden, die dieselbe Last tragen können.

Zwischen den beiden Abszissen sind die Querschnitte in flächiger Form nach der Linie (a) maßstäblich einmal für quadratischen Draht und einmal als 1 mm breite Lamelle einer Wand dargestellt.

Die Fläche (III), unterhalb der Abszisse dargestellt, zeigt das Gewicht eines Stabs mit dem Querschnitt nach (II) für 1 m Stablänge. Diese zwischen zwei annähernd parallel verlaufenden Linien eingeschlossene Fläche läßt erkennen, daß, von dieser Seite betrachtet, mit allen bezeichneten Stoffen leicht gebaut werden kann.

Die im Bild 2.3 entwickelte Systematik bestätigt zunächst, daß sich die für den Leichtbau günstigste Beziehung zwischen Festigkeit und Gewicht von Werkstoffen mit sehr unterschiedlichem innerem Feinbau erfüllen läßt. Für die Fertigung im Leichtbau ist es wichtig, daß mit z u n e h m e n d e m spezifischem Gewicht der verwendetem Werkstoffe die W a n d d i c k e n der Bauelemente a b n e h m e n müssen. Die Wanddicken beeinflussen aber die K n i c k v e r h ä l t n i s s e und F o r m u n g s m ö g l i c h k e i t e n recht unterschiedlich. Für die Fertigung liegen die Werkstoffe mit n i e d r i g e m spezifischem Gewicht am günstigsten.

Die Entwicklung der Werkstoffe zu höherer Festigkeit führt im allgemeinen zu immer geringerer Dehnung und komplizierter Wärmebehandlung bei spanloser Formung. Außerdem muß mit zunehmender Festigkeit und abnehmender Dehnung eine immer höher wertige Oberfläche verlangt werden, wenn eine genügende Dauerfestigkeit garantiert werden soll. Die häufigen Lastwechsel (Schwingungen) wirken sich besonders bei hochbeanspruchten Teilen immer stärker aus. Die Homogenität der Werkstoffe muß in hohem Grad vorhanden sein, denn Ungleichmäßigkeiten, Schieferungen und Lunker wirken wie eine i n n e r e K e r b u n g . Nicht genügende Oberflächengüte und Beizkerben stellen die ä u ß e r e K e r b u n g dar. Die Ansprüche an die Fertigung erhöhen sich mit zunehmender Festigkeit wesentlich. Die diesbezüglichen Arbeitsverfahren und die erforderlichen Arbeitsmittel werden also in der Perspektive eine starke Entwicklung erfordern. Die Formung in erweichten Zuständen erfordert bekanntlich eine nachträgliche Verfestigung. Dabei ist mit der Gefahr des Ver-

ziehens zu rechnen. Kunstgriffe und Vorrichtungen zum Geradehalten oder Geraderichten werden erforderlich.

Für die Perspektive ist zu erkennen, daß die Entwicklung der Werkstoffe sich auf Legierungen d e r Metalle ausdehnen muß, die mindestens oberhalb der Linie σ_z/γ = 15 000 m liegen. Im Vordergrund der Entwicklung stehen die Legierungen von Magnesium, Beryllium, Aluminium und Titan. Neue Legierungen weiterer Metalle werden sich in die dargestellten Verhältnisse einfügen müssen.

Die Entwicklung der Kunststoffe als Werkstoffe des Leichtbaus erscheint sehr aussichtsreich.

2.3 Entwicklung im Bereich der spanlosen und spanenden Formung

Bereits die zuvor behandelten Festigkeitsverhältnisse weisen auf die immer schwierigere spanlose Formung hin. Im Bild 2.4 wurde für die Darstellung der Formungsfaktoren eine ähnliche Form gewählt, wie sie auch für die Festigkeits- und Gewichtsverhältnisse benutzt worden ist.

Da die spanlose Formung oberhalb der Fließgrenze stattfindet, ist bis zu einem gewissen Grad der längere oder kürzere Verlauf der Dehnung zwischen Fließgrenze und Bruchgrenze ein Kriterium der Formbarkeit. Im Bild sind oberhalb der Abszisse die Fließverhältnisse und unterhalb der Abszisse die Dehnungsverhältnisse der wichtigsten Leichtbau-Werkstoffe dargestellt. Außerdem weisen die Zeichen + und ⊕ auf die Brinellhärte hin. Es ist versucht worden, mit diesen Kriterien die Formungsverhältnisse zu beleuchten und dazu auch noch die bekannten Tiefungsproben anzuwenden.

Mit der im Bild 2.4 gegebenen Darstellung kann eigentlich nur gezeigt werden, wie unzulänglich diese normalen Kriterien bezüglich der verschiedenen Formungsarten sind. Es läßt sich daraus nicht einmal klar ersehen, in welchem Verhältnis das Dehnungs- bzw. Formungsverhalten der hochwertigen Werkstoffe mit größeren γ zu den Werkstoffen mit kleinerem γ steht. Die dazwischen liegenden Titanlegierungen haben sogar eine relativ große Dehnung. Auch die Möglichkeiten einer günstigen Formung durch Erweichen und erneutes Härten lassen sich aus diesem gegebenen

Kriterium nicht ersehen oder vergleichen. Man wird also bei den früher benutzten Erprobungs- und Vergleichsverfahren vorläufig bleiben müssen, die typische, nach verschiedenen Formungsverfahren geformte Teile mit Bewertungszahlen versehen und somit Vergleiche innerhalb der verschiedenen Werkstoffe zulassen.

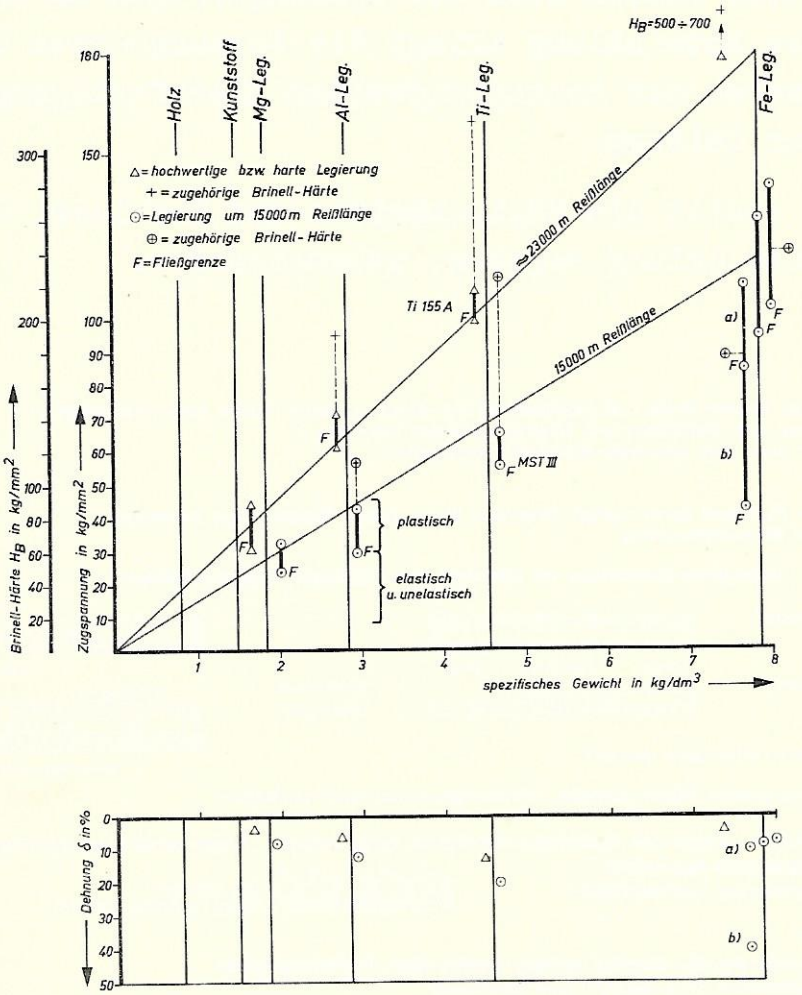


Bild 2.4: Formungsfaktoren
Fließgrenze-Härte-Dehnung

Auf jeden Fall werden aber unter der Voraussetzung gleicher Festigkeit die Werkstoffe mit hohem spezifischem Gewicht und demnach geringer Wanddicke für geformte Teile mit hoher Auslastung ungünstiger liegen als die Werkstoffe mit niedrigen Werten und dicken Wänden.

Die aus der Entwicklung der aerodynamischen Formen bei hohen Fluggeschwindigkeiten resultierenden zusammengedrückten Flächen- und Leitwerkprofile als Biegeträger mit erheblichen Wanddicken führen von der Verwendung gewalzter dünner Bleche mit aufgesetzter Verrippung ab. Am Beispiel der auf Grund dieser Entwicklung entstehenden großen verrippten und räumlich geformten Platte lassen sich die Formungsfragen am besten erläutern. Diese Entwicklung bringt die Formungsarten Gießen und Pressen neben der hochentwickelten Blechfertigung im Leichtbau wieder zur Geltung.

Das Bild 2.5 stellt die Möglichkeiten und Probleme, die sich aus dieser Entwicklung ergeben, nebeneinander.

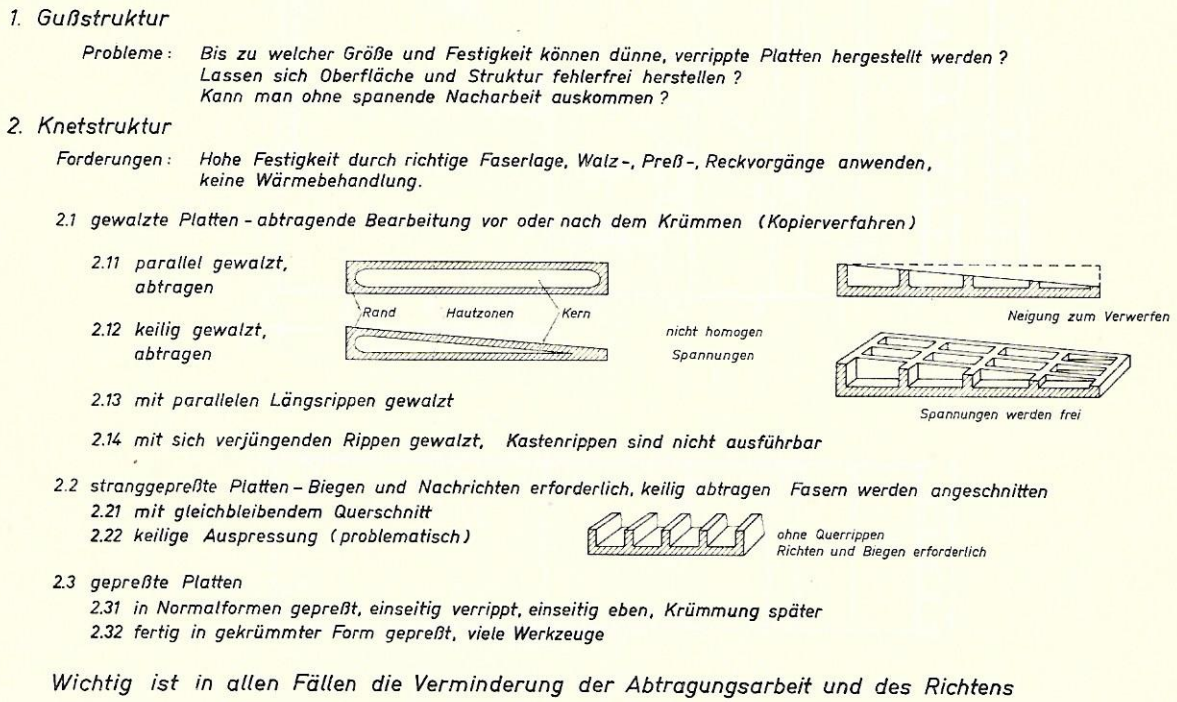


Bild 2.5: Herstellung großer verrippter Hautplatten mit hoher Festigkeit

Die G u ß s t r u k t u r fiel bisher für große, hochbelastete Leichtbauteile vollkommen aus. Inzwischen ist die Gießtechnik in Richtung auf Hochwertigkeit und dünne Wandungen für die Leichtmetalle, aber noch mehr für die Schwermetalle, ein gutes Stück weitergekommen. Damit werden auch im Leicht-

bau immer größere, plattenartige Teile mit Gußstruktur verwendbar. Folgende drei Probleme werden bei dieser Entwicklung im Vordergrund stehen:

1. Bis zu welcher Größe und Festigkeit können dünne, verrippte Platten gießtechnisch hergestellt werden?
2. Ist dabei in genügend hohem Maße eine fehlerfreie Oberfläche und Struktur zu erreichen?
3. Kann man mit immer weniger und schließlich ohne spanende Nacharbeit auskommen?

Die K n e t s t r u k t u r , die im gewalzten Werkstoff bisher als Blech verschiedener Dicken und als Profil im Leichtbau am meisten angewendet wurde, ist in letzter Zeit zu einem Teil auch in Form gepreßter Platten zur Geltung gekommen. Die Herstellungsverfahren erreichen die höheren Festigkeiten durch die Ausrichtung des strukturellen Aufbaus des Werkstoffs in gewollter Richtung. Sie sind gekennzeichnet durch die erforderlichen großen Einrichtungen zur Durchführung der Walz-, Reck- und Preßvorgänge. Veredlungs- und Richtvorgänge kommen in vielen Fällen hinzu. Es handelt sich also hierbei gleichzeitig um eine Mechanisierung des Leichtbaus in der Richtung auf sehr große Einrichtungen und Maschineneinheiten, die in ihren Grundzügen bekannt sind. Diese Entwicklung des Leichtbaus weist gleichzeitig auf eine vermehrte Anwendung dieser Einheiten für andere Gebiete, wie Waggon-, Auto- und Schiffbau hin.

G e w a l z t e P l a t t e n werden zunächst noch aus vollen, dicken Blechplatten zu verrippten, konischen und gekrümmten Platten hergestellt. Man kann vor oder nach dem Krümmen im Kopierverfahren spanend bearbeiten. Im ersten Fall sind die Maschineneinheiten zwar groß, aber in der Bauart einfacher als für das Kopieren im schon vorgekrümmten Zustand der Halbzeuge. Das Krümmen nach der Herausarbeitung der Rippen aus dem Vollmaterial wird schwierig durch die wechselnden Widerstandsmomente der Plattenquerschnitte. Eine wesentliche Einsparung an Spanungs- bzw. Abtragungsarbeit kann schon erzielt werden, wenn die großen Platten konisch ausgewalzt als Halbzeug hergestellt werden. In beiden Fällen ist aber damit zu rechnen, daß sie sich erheblich verwerfen. Je dicker das Halbzeug ist, desto mehr muß mit Rand-, Kern- und Hautzonen gerechnet werden. Im nicht homogenen Werkstoff werden innere Spannungszustände abgestützt, die

dann beim Abtragen frei werden. Durch Richtarbeit muß ein neuer Spannungsausgleich hergestellt werden, der das Werkstück in der gewollten Stellung hält. Es ist möglich, daß beim langsamen Abtragen großer Flächen eine geringere Verwerfung eintritt als beim örtlichen Abtragen durch spanende Werkzeuge, die durch örtliche Erwärmung zusätzliche Spannungen hervorrufen können.

Beim Abtragen aus dem Vollen kann man jede gewünschte Rippenanordnung erzeugen, so vor allem Kastenrippen mit konischem bzw. konvergentem Verlauf. Die Abtragungsarbeit könnte vermindert werden, wenn die Rippenform schon weitgehend mit eingewalzt wird, wobei die parallele Rippenführung nicht an die ideale Form herankommt, die durch Herausarbeiten aus dem Vollen erzielbar ist. Es ist jedoch durch komplizierte Walzeinrichtungen möglich, auch konisch und konvergent verlaufende Rippen herzustellen.

S t r a n g g e p r e ß t e P l a t t e n sind ein vorläufiger Ausweg. Sie lassen sich zunächst nur in beschränkter Plattenbreite herstellen. Man kann übrigens viele dieser Formen auch zwischen Walzen erzeugen, wobei eine Vergrößerung der Breite möglich erscheint.

Auch das aus der Strangpreß-Düse austretende Plattenmaterial muß noch gerichtet werden. Es ist denkbar, daß diese Richtarbeit durch sofort hinter der Düse wirkende Einrichtungen ausgeführt werden kann. Solange man die komplizierte keilige Auspressung durch zustellbare Düsen nicht ausführen kann, muß nachträglich keilig gespant bzw. abgetragen werden.

G e p r e ß t e P l a t t e n erfordern große Presseneinheiten, die je Quadratmeter gepreßte Fläche etwa 10 000 bis 15 000 t Preßkraft erfordern. Mit diesem Verfahren kann man einseitig verrippte Platten in ebener oder gekrümmter Form herstellen. Das Verfahren erfordert große Werkzeuge, die erst bei großer Stückzahl wirtschaftlich werden. Erst bei genauester Auspressung kann die Spanungsarbeit an solchen gepreßten Platten vollkommen eingespart werden.

2.4 Probleme der Verbindung

Auch auf dem Gebiet der Verbindungen im Leichtbau soll der z.Z. sichtbare Entwicklungsweg systematisch dargestellt werden, um

zu Schlußfolgerungen für die Weiterentwicklung zu kommen. Folgende Problemkomplexe lassen sich im Bereich der Verbindungen erkennen:

a) Die Herstellung der Verbindung durch verschiedene meist bekannte Verfahren läßt die Entwicklung der Werkzeuge und Maschinen zur Automatik erwarten.

b) Die Festigkeit der Verbindung ist grundsätzlich in der Richtung zu entwickeln, daß der Verbindungsstoß keine Unterbrechung der Homogenität des Werkstücks darstellt. Der Kräfteverlauf soll also keine Ablenkungen erfahren. Die Dauerfestigkeit soll nicht durch innere und äußere Kerbwirkungen beeinträchtigt werden. Die Dichtheit der Verbindungsstelle muß von selbst eintreten.

c) Die Verfahren, die zur Herstellung einer homogenen und festen Verbindung eines Stoßes angewandt werden, müssen später notwendige Vergütungen bzw. Glühungen gestatten, ohne daß eine neue Differenzierung zwischen dem Werkstoff der Verbindungsstelle und dem eigentlichen Werkstück eintritt.

d) Das Korrosionsverhalten muß so sein, als wäre keine Verbindungsstelle vorhanden, Elementbildung muß also ausgeschlossen sein. Ebenso dürfen keine korrodierenden Medien in Fugen und Risse eindringen.

e) Das Gewicht des Bauteils darf durch die Verbindunggstelle nicht erhöht werden, wie es in den meisten Fällen durch die Verschiedenheit der Querschnitte der Teilwerkstücke und dem Querschnitt des Stoßes der Fall ist (vgl. Q_1 und Q_2 in Bild 2.6).

Als Ausgangspunkt für Schlußfolgerungen im Bereich der Verbindungsprobleme sind im Bild 2.6 die beiden ursprünglichen, bekannten Verbindungen Nieten (1) und Hammerschweißen (2) gewählt worden.

Bei N i e t v e r b i n d u n g e n (1) ergibt sich aus dem Kräfteverlauf, daß die Zugkraft über Scherung und Lochleibung wieder in Zug (bzw. auch Druck) umgewandelt wird. Dabei ergibt sich bekanntlich viel unbelastetes Material und damit unerwünschtes Gewicht.

Eine gute H a m m e r s c h w e i ß u n g (2) kann der Homogenität der Verbindung sehr nahe kommen und eine klare Zug-(Druck-)übertragung erreichen.

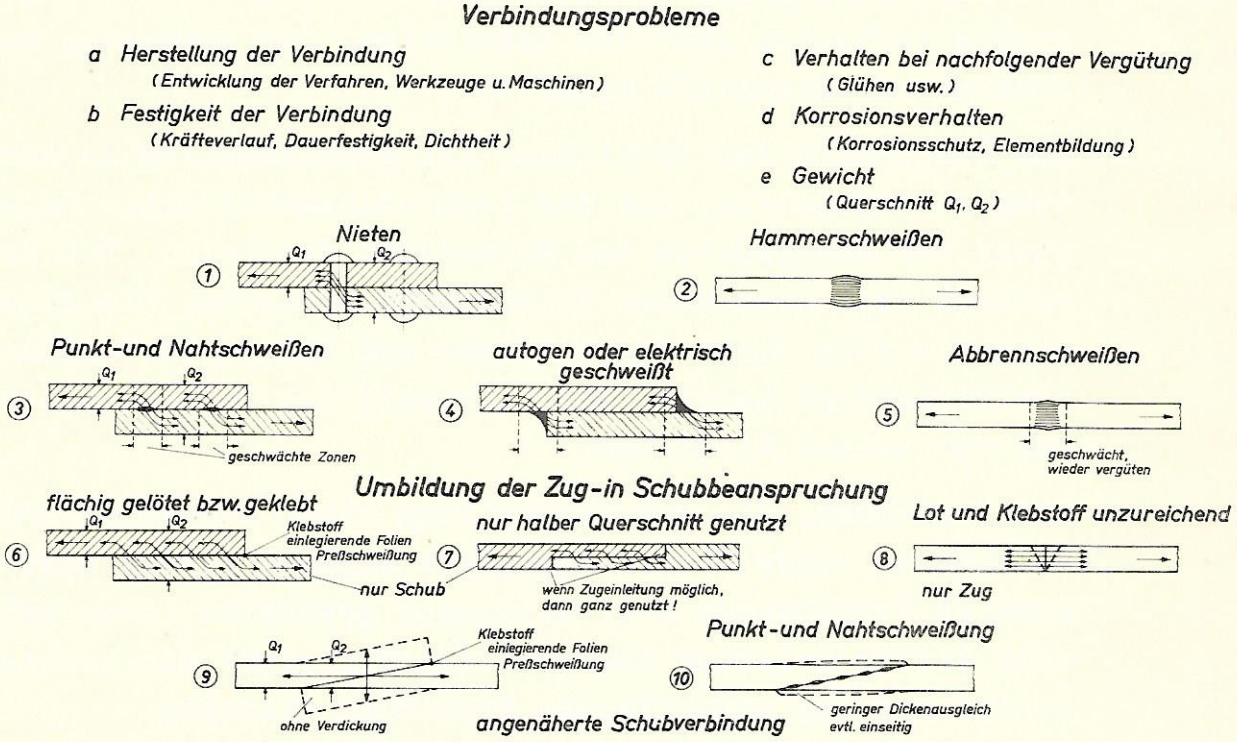


Bild 2.6: Technologische Probleme der Verbindung im Leichtbau (Studie)

P u n k t - oder N a h t s c h w e i ß e n (3) führt wie der Fall (1) zu einer Konzentration der Kräfte in den Schweißstellen und zu unbelastetem Material. Außerdem ist mit der Entfestigung einer bestimmten Zone in der Nähe der Schweißstelle zu rechnen. Die Entwicklung dieser Verbindungsart soll einmal vollkommene Homogenität zwischen Schweißstelle und Ursprungs-Werkstoff erreichen, zum anderen soll die durch Erhitzung erweichte Zone möglichst klein gehalten werden bzw. ganz verschwinden.

Der Fall (4) aus dem Gebiet der a u t o g e n e n oder e l e k t r i s c h e n N a h t s c h w e i ß u n g ist hier in einer ungünstigen Form angeführt, die in die Schubverbindungen überleiten soll, gleichzeitig aber auch die auf Zug beanspruchte Naht einleitet. Die beiden Schweißnähte übertragen die Belastung des Teils durch Schub und Zug. Gewichtsmäßig ist diese Möglichkeit naturgemäß nicht günstig.

Das A b b r e n n s c h w e i ß e n (5) ist dem Hammerschweißen des Falls (2) zugeordnet. Die durch Erhitzung geschwächte Zone muß durch entsprechende Verfahren wieder vergütet werden.

Die im Fall (6) gekennzeichnete Verbindung durch L ö t e n oder K l e b e n geht darauf hinaus, durch einen Zwischenstoff in Form des Lots oder des Klebmittels die Kräfte im Schub zu übertragen, wobei eine Zugkomponente (Abbiegen) auftritt, die möglichst klein sein soll. Je weiter man zur Vergrößerung der Schubübertragungsfläche die Einzelstücke übereinanderlegt, desto größer wird die unausgenutzte Materialmenge und damit das Gewicht der Verbindung.

Der Fall (7) ist nur zur Verdeutlichung der Verhältnisse eingefügt. Da eine Zugeinleitung in den Stirnstößen bei gleichzeitiger Schubwirkung in der Übereinanderlage kaum möglich sein wird, kann nicht mit voller Auslastung des Querschnitts gerechnet werden.

Der Fall (8) ist wieder den Fällen (2) und (5) zuzuordnen. Lot und Klebstoff lassen eine volle Übertragung der Kräfte durch Zug nicht erwarten. Die Kerbschweißnaht könnte mit dem Ziel der Homogenität ohne Gewichtszuwachs entwickelt werden.

Der Fall (9) ist die Fortentwicklung des Falls (6) mit dem Ziel der Gewichtseinsparung. Die Anwendung von Klebstoffen erscheint noch als eine unvollkommene Lösung des Problems. Sie hat z.Z. noch den Vorteil, daß man ohne bzw. mit unschädlicher Erwärmung auskommen kann. Noch nicht gelöst ist hierbei die Zuverlässigkeit der Klebung, insbesondere bei den hohen Temperaturen des Überschallflugs. Dieser Umstand drängt dazu, die artfremden Verbindungsstoffe zu Gunsten metallischer Verbindungen zu verlassen und in der Richtung des Lots etwa in Form von eingelegten Metallfolien weiterzuarbeiten. Auch die "Zusammenlösung" der Werkstoffe auf chemischem Weg nach dem Vorbild des "Zusammenrostens" etwa im Sinn der anodischen Oxydation könnte ein Entwicklungsweg sein. Auch der an sich bekannte Weg des Preßschweißens kann in manchen Fällen zur Anwendung kommen.

Der Fall (10) sieht vor, mit der Punkt- oder Nahtschweißung in klarere Schubverhältnisse überzugehen, wobei ein etwa notwendiger Dickenausgleich auch einseitig gelegt werden kann.

Die Verschiedenheit der möglichen Verbindungsarten zeigt, daß die Weiterentwicklung der erforderlichen Werkzeuge und Maschinen zu Automaten auf den Gebieten des Nietens, Schweißens und Klebens liegen wird. In allen drei Grundarten, die noch für sich spezialisiert sein werden, ist eine beidseitige Zugänglichkeit der Werkstücke erwünscht bzw. notwendig. Daraus ergibt sich eine konstruktive Entwicklung der Bauteile in Form von Platten und Schalen.

2.5 Baustoffe und Bauweisen im Zusammenhang mit der Entwicklung von Arbeitsverfahren für leichte Bauelemente

Neben der Entwicklung von Verfahren und Maschinen für Formung und Verbindung sind seit langem vor allem die zellenartig aufgelockerten bzw. abgestützten Leichtbauelemente Gegenstand der Forschung im Flugzeugbau. Als natürlicher Ausgangspunkt in dieser Richtung ist die zellenartige und faserige Struktur des Holzes anzusehen. Wie bereits aus dem Bild 2.2 zu erkennen ist, liegt das Holz mit seinen edlen Qualitäten über der unteren Reißlänge von 15 000 m. Der Flugzeugbau hat sich nun besonders mit der zellig abgestützten Metallhaut beschäftigt, wobei auch Kombinationen von Holz und Kunststoffen mit dem gleichen Ziel, der abgestützten glatten Haut, gebildet wurden. In neuer Zeit wird vor allem an den Zellen- und Wabenkonstruktionen gearbeitet. Es erscheint daher zweckmäßig, auch das Gebiet der Leichtbauelemente durch eine systematische Betrachtungsweise aufzulockern. Dieser Versuch wird in den Bildern 2.71 bis 2.75, die auf Seite 57 noch einmal zu einer Übersicht (Bild 2.7) vereinigt werden, vornehmlich für die abgestützte metallische Haut unternommen, weil sie in letzter Zeit vor allem durch die Weiterentwicklung der Klebeverfahren für Metalle besonders an Bedeutung gewonnen hat.

Die systematische Gliederung untersucht zunächst f r e i - s t e h e n d e S t ü t z g e r ü s t e (Bild 2.71) für sich.

Körnige Stütz- bzw. Füllkörper, die z.B. die Funktion des füllenden Balsaholzes übernehmen können, erfordern eine Versteifung durch ein zugesetztes Bindemittel. Die Zellenstruktur kann Bläschen- oder Röhrenform haben, wobei Schwamm, Schaumgummi und Schaumstoffe oder auch Holz und Rohr als Vorbild dienen.

Die Zellen- oder Röhrenstruktur kann dabei senkrecht zu der zu stützenden Fläche oder parallel verlaufend ausgebildet sein. Im letzteren Fall läßt sich leicht das Widerstands- bzw. Trägheitsmoment des zu bildenden Körpers durch eine Verdichtung nach außen vergrößern. In gleicher Weise läßt sich auch ein Stabnetzwerk entweder gleichmäßig oder nach außen verstärkt ausbilden. Auch ein für sich gebildetes Rippengerüst mit nach außen zunehmender Verdichtung bzw. Verstärkung kann als fabrikationsmäßig herstellbare Füllung von Leichtkörpern dienen.

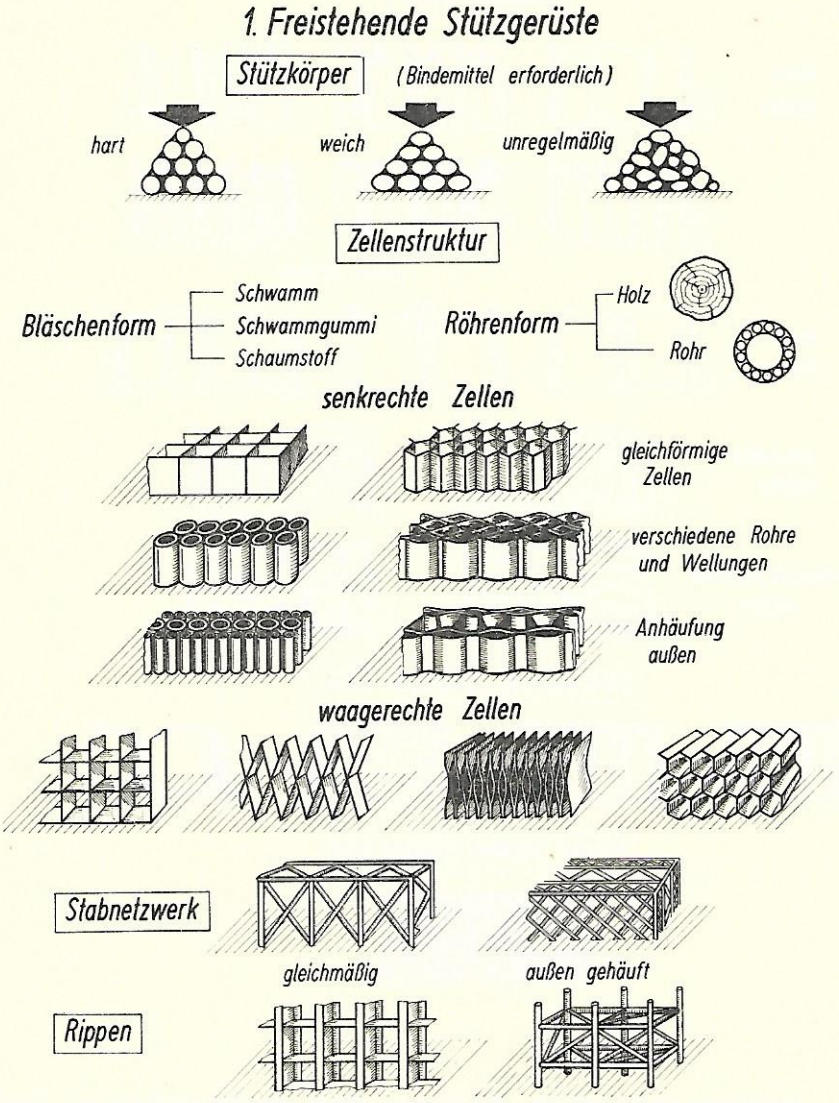


Bild 2.71: Systematischer Aufbau der aufgelösten Leichtwand

Als weiteres Glied des aufgelockerten Leichtbaus kann die Haut eines kombinierten Elements angesehen werden. Sie wird für den Flug mit hohen Geschwindigkeiten an der Außenfläche immer glatt

verlangt. Blech, Sperrholz, Webstoffe und Kunststoffe können sie bilden, wobei bei entsprechender Wanddicke und somit auseinandergezogener Rippenabstützung eine sekundäre Abstützung nicht erforderlich ist. Es ist aber auch möglich, bei innen liegenden Bauelementen eine i n s i c h s e l b s t g e s t ü t z t e H a u t zu verwenden. Die Möglichkeiten hierzu seien deshalb kurz skizziert (Bild 2.72).

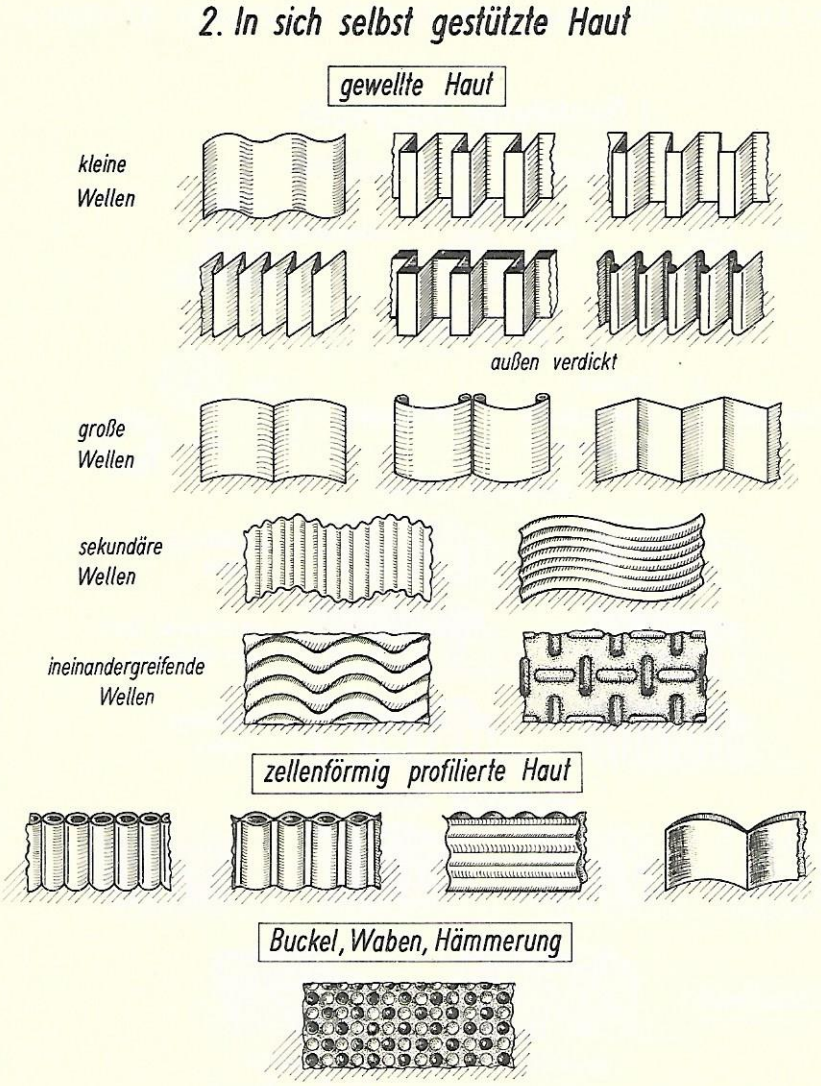


Bild 2.72: Systematischer Aufbau der aufgelösten Leichtwand

Die gewellte Haut oder Wand ist in kleiner und größerer Wellung und verschiedener Wellenform bekannt. Weniger bekannt ist die Werkstoffanhäufung in den Kämmen der Wellen, um ein größeres Trägheits- und Widerstandsmoment zu erzielen. Die Anwendung sekundärer und ineinandergreifender Wellung ist bekannt, aber we-

nig anwendbar. Hierher gehört auch die Versteifung durch Hämmerung oder Buckelung. Die Auflösung der Haut durch zellenförmige Profilierung führt bereits in das Gebiet der doppelwandigen Bauelemente hinüber.

Die e i n s e i t i g g e s t ü t z t e , g l a t t e H a u t (Bild 2.73) besteht aus der Haut selbst, die aus verschiedenen Werkstoffen entsprechender Glätte und Festigkeit bestehen kann, und der Abstützung, die aus Elementen der anfangs zusammengestellten Stützgerüste zu bilden ist. Es tritt hier das Problem der günstigsten Verbindung von Haut und Gerüst auf. Bisher wurde die Zelle hinter der glatten Haut vornehmlich durch Nieten und Schweißen befestigt.

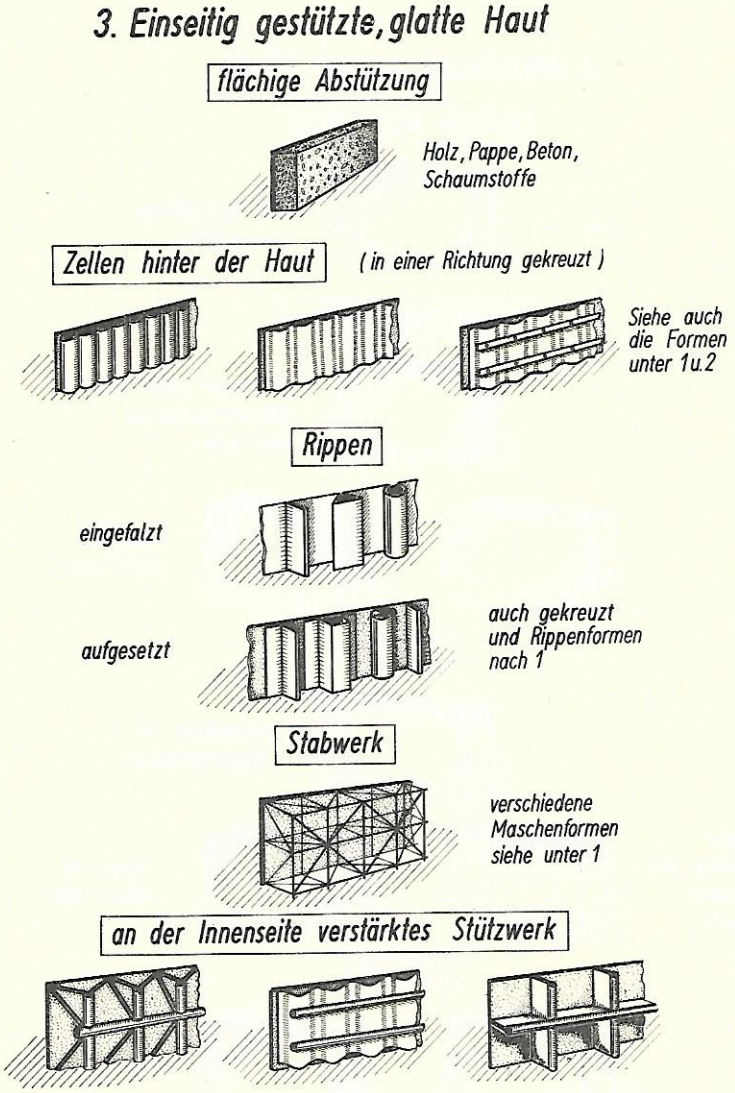


Bild 2.73: Systematischer Aufbau der aufgelösten Leichtwand

Die verbesserten Klebemittel und Klebeverfahren weisen auf neue Möglichkeiten hin. Aber auch das Schweißen wird bei entsprechender Weiterentwicklung der Verfahren für die Verbindung Haut - Stützgerüst Bedeutung haben.

Die dargestellte Systematik weist zuerst auf die seit langem bekannte flächige Abstützung durch Holz, Pappe, Schaumstoffe und Beton hin. Die eingefalzte Verrippung ist nur der Vollständigkeit halber angeführt. Wichtig und bekannt ist die aufgesetzte Verrippung. Die hier meist angewandte Verbindung durch Nieten und Schweißen wird zu einem Teil durch Kleben ersetzt werden können. Weitere Verstärkungsmöglichkeiten ergeben sich durch aufgeschweißte oder aufgeklebte Maschenstabwerke oder Zellensysteme.

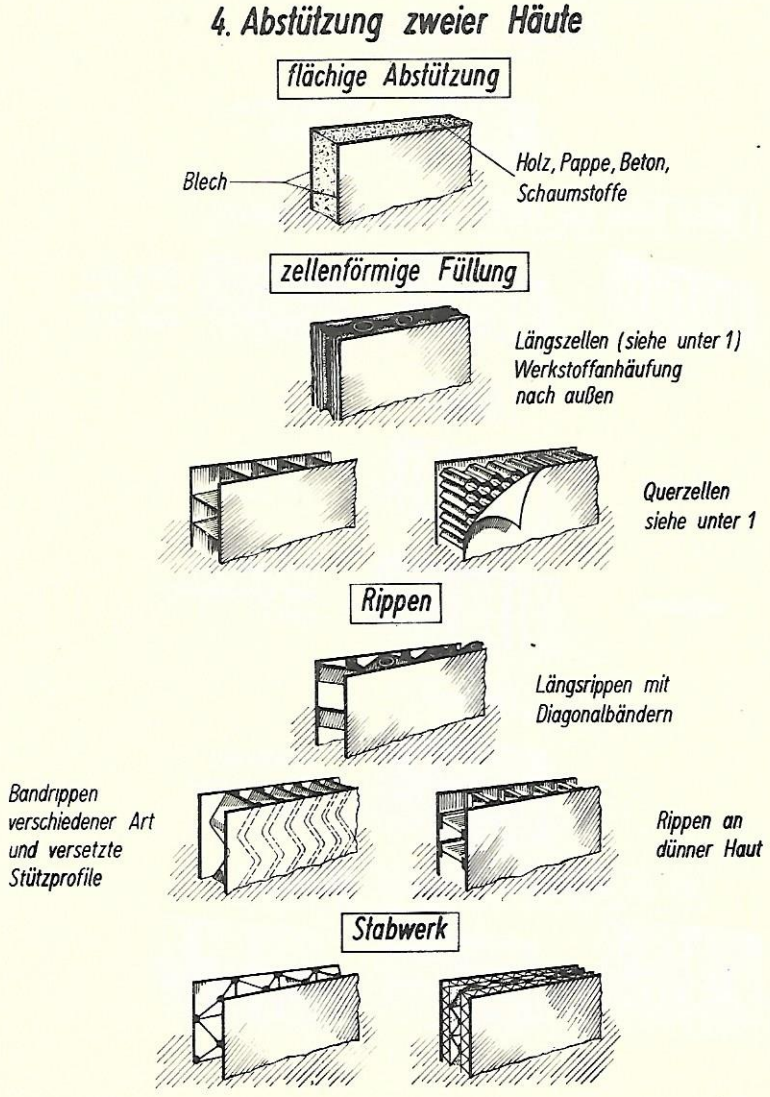


Bild 2.74: Systematischer Aufbau der aufgelösten Leichtwand

Eine Verstärkung des Gesamtelements kann erreicht werden, wenn auf der offenen Innenseite ein Stabwerk angebracht wird. Diese Lösung leitet über zu der inneren A b s t ü t z u n g z w e i e r H ä u t e (Bild 2.74), die in dieser Verbindung versteifte Leichtplatten bilden, zu denen auch die Wabenplatten gehören.

Eine einfache Ausführung benützt zur inneren Abstützung leichtes Holz (Balsa) oder Schaumstoffe. Die körnig eingeführte und durch Bindestoffe erhärtete Füllung gehört zu dieser Art innerer Abstützung. Auch die zellenförmige Abstützung mit Zellengebilden aus Blech, Draht und Profilen ist bekannt. Die Entwicklung dieser Systeme bei Anwendung bekannter Schweißverfahren kam bisher nicht zur Anwendung im Leichtbau. Die verbesserten Klebeverfahren führen zu einer Belebung dieser Entwicklung.

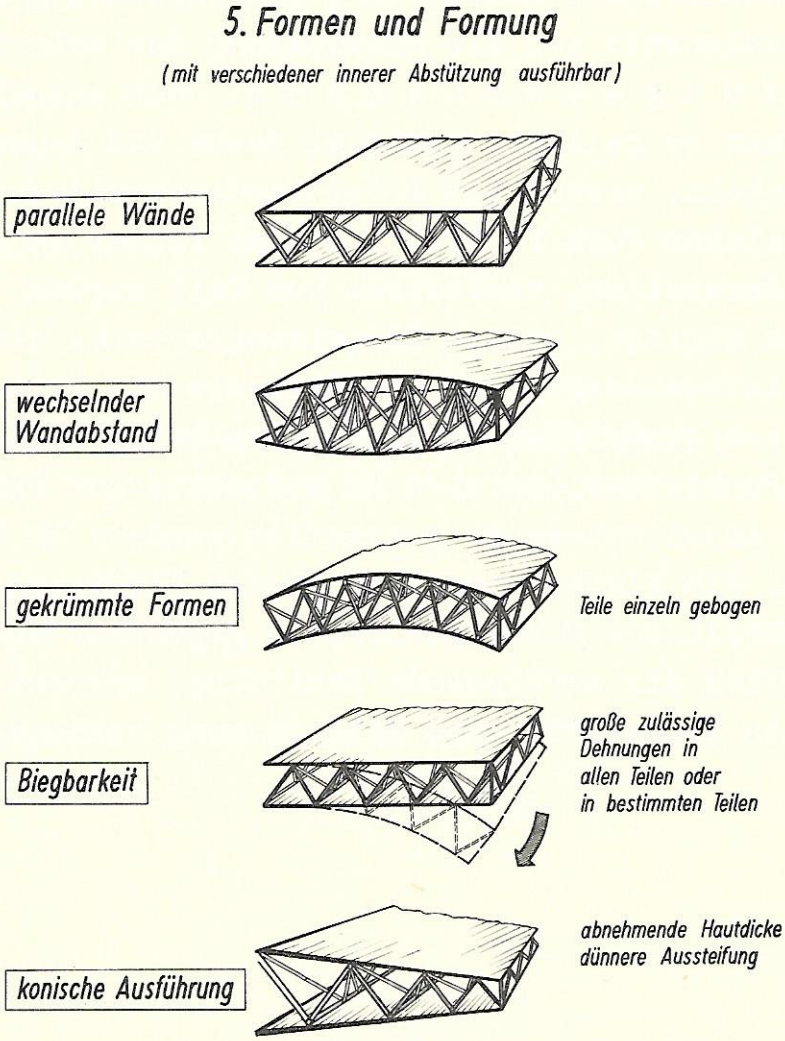


Bild 2.75: Systematischer Aufbau der aufgelösten Leichtwand

Als besondere Problematik führt das Bild 2.75 F o r m e n und F o r m u n g der doppelwandigen, innen abgestützten Elemente an. Die Wand aus parallelen Platten ist zunächst die einfachste Lösung. Wenn die Außenhäute der Plattenkörper in verschiedenem Abstand zueinander liegen, wie z.B. bei Leitwerksteilen, sind gewisse Formen der Zellen- oder Wabenkörper gegenüber anderen Formen im Vorteil. Doppelwandige gekrümmte Platten lassen sich über Grundformen relativ günstig herstellen, wenn man die Einzelteile für sich gekrümmt herstellt und dann verbindet. Biegbare Doppelplatten, die man zum Beispiel aus Teilen mit großer, in den Einzelelementen verschiedener Dehnung herstellen könnte, haben zunächst festigkeitsmäßig wenig Bedeutung.

Für die wirtschaftliche Herstellung und Verwendung doppelwandiger Leichtbauelemente ist die Entwicklung der erforderlichen V e r b i n d u n g s v e r f a h r e n von ausschlaggebender Bedeutung. Wenn es gelingt, genügend feste und dauerhafte Kleber zu entwickeln, treten die Widerstandsschweißverfahren, die in übersichtlicher Form im Bild 2.8 eine früher angestrebte Entwicklung darstellen, vielleicht zum Teil zurück. Es erscheint aber durchaus möglich, einige Schweißungssysteme wirtschaftlich anzuwenden. Insbesondere sind die Elemente mit fortschreitend eingeschweißten Bandriffen erfolgversprechend, wenn hierfür erforderliche Punktschweißanlagen zu automatischer Durchführung des gesamten Arbeitsvorgangs geschaffen werden. Es dürfte auch möglich sein, die Platten zwischen großen Elektroden zu schweißen. Der Nachteil der Schweißverfahren gegenüber der Klebung bleibt natürlich die auftretende Erhitzung, während beim Kleben auch veredelte Werkstoffe ohne Entfestigung verbunden werden können.

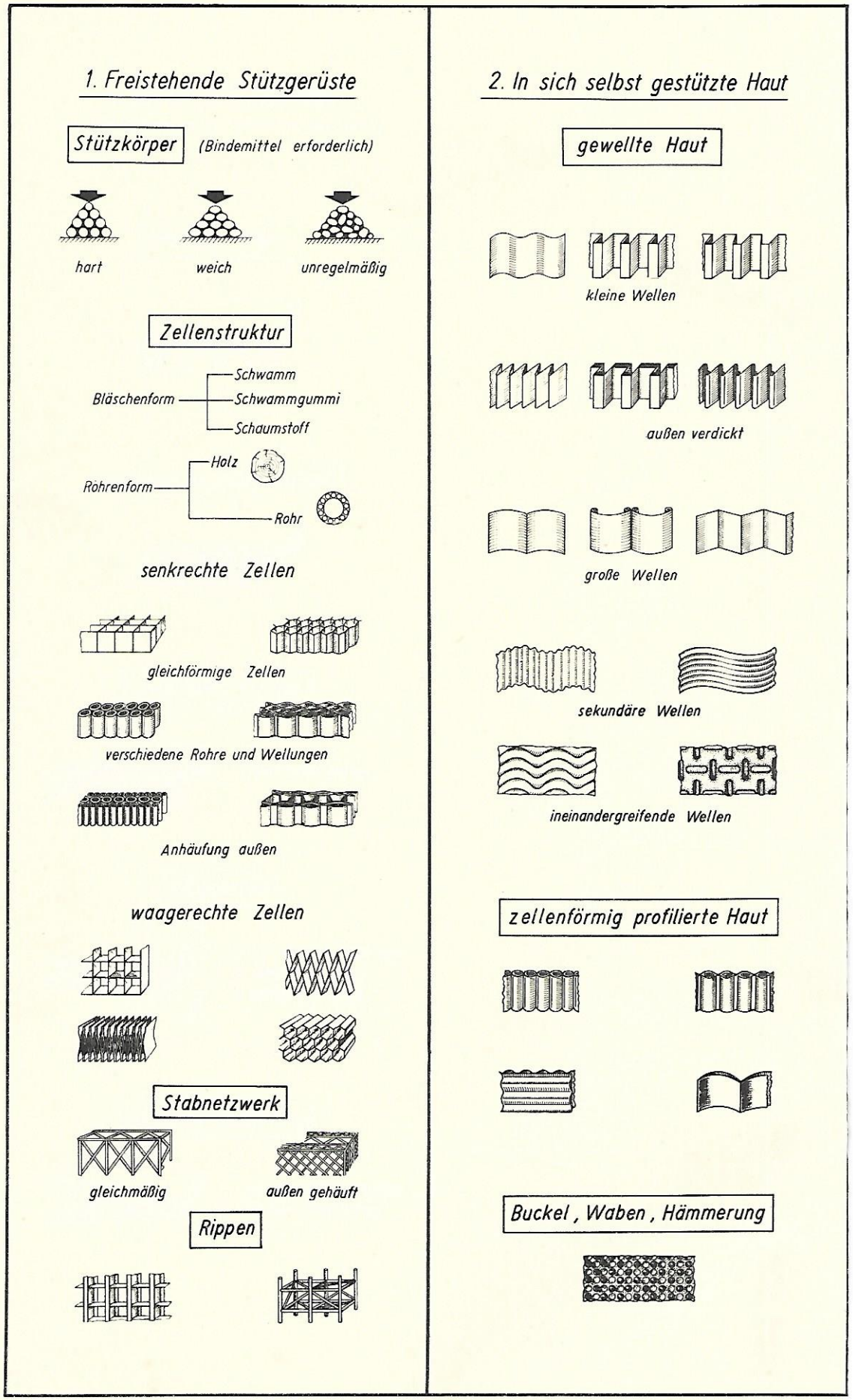


Bild 2.7: Systematischer Aufbau der aufgelösten Leichtwa

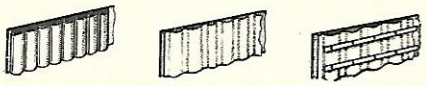
3. Einseitig gestützte, glatte Haut

flächige Abstützung

Holz. Pappe, Beton, Schaumstoffe

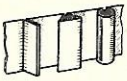
Zellen hinter der Haut

(in einer Richtung gekreuzt)

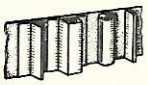


siehe auch die Formen unter 1 und 2

Rippen



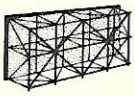
eingefalzt



aufgesetzt

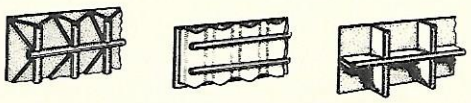
auch gekreuzt und Rippenform nach 1

Stabwerk



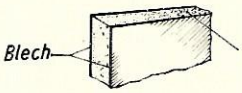
verschiedene Maschenformen siehe unter 1

an der Innenseite verstärktes Stützwerk

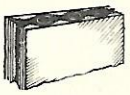


4. Abstützung zweier Häute

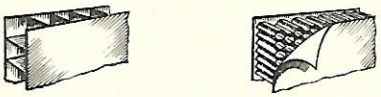
flächige Abstützung



zellenförmige Füllung

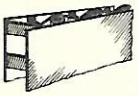


Längszellen (siehe unter 1) Werkstoffanhäufung nach außen



Querzellen siehe unter 1

Rippen



Längsrippen mit Diagonalbändern

Bandrippen verschiedener Art und versetzte Stützprofile

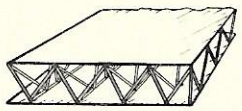
Rippen an dünner Haut

Stabwerk

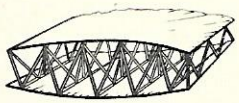
5. Formen und Formung

(mit verschiedener innerer Abstützung ausführbar)

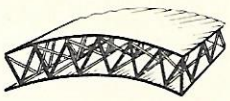
parallele Wände



wechselnder Wandabstand

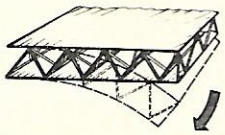


gekrümmte Formen



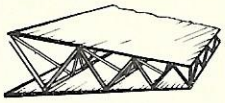
Teile einzeln gebogen

Biegbarkeit



große zulässige Dehnungen
in allen Teilen oder
in bestimmten Teilen

konische Ausführung



abnehmende Hautdicke
dünnere Aussteifung

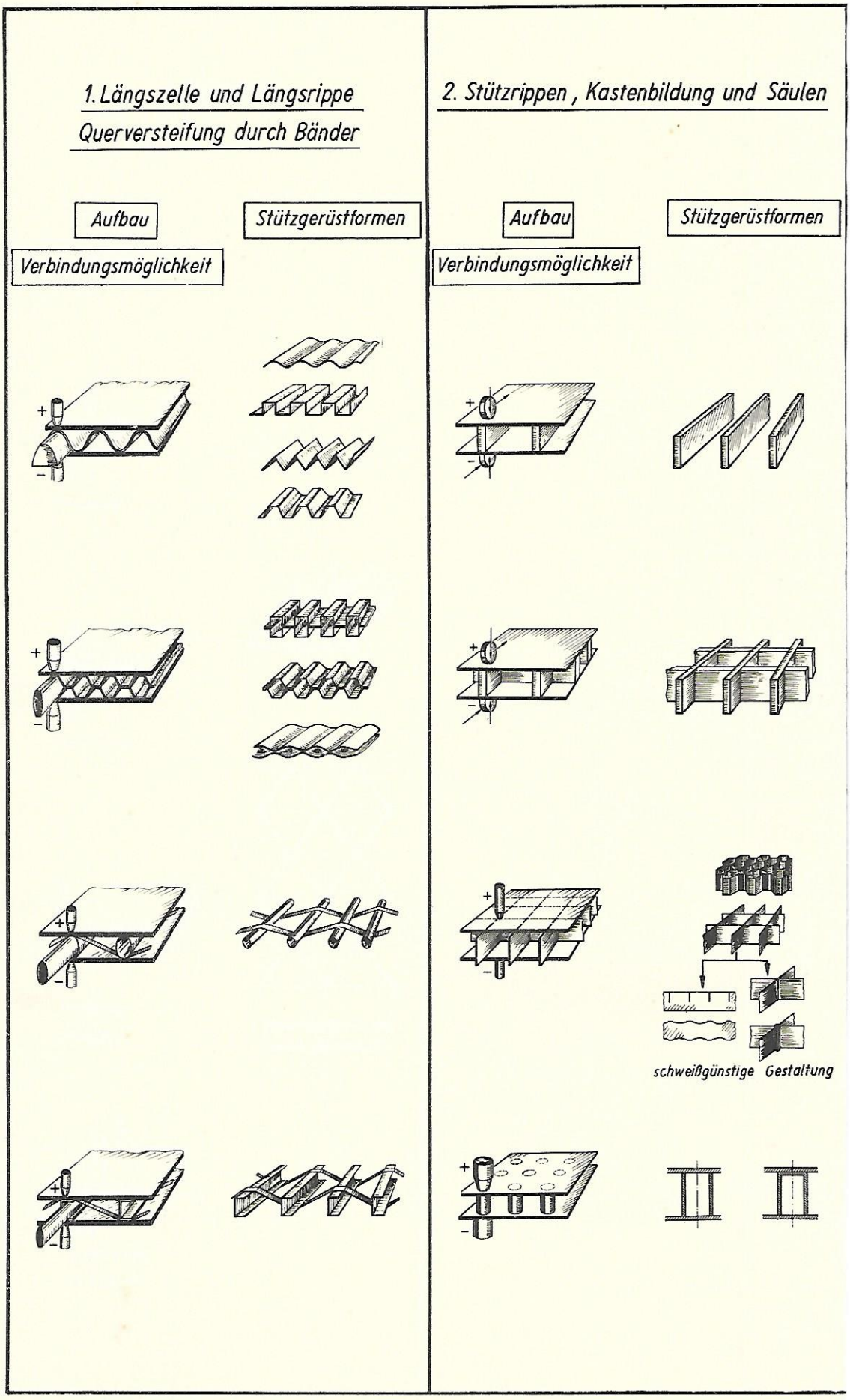
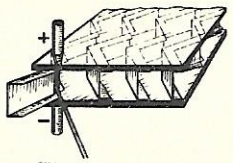


Bild 2.8: Verfahren zur Herstellung doppelwandiger Träge
bleche (Verbindungsart: Widerstandsschweißen)

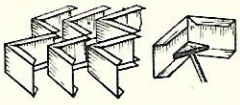
3. Bandrippen, ineinandergreifend

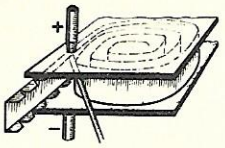
Aufbau / Verbindungsmöglichkeit



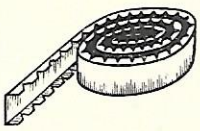
geführte Zwischenelektrode

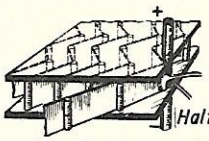
Stützgerüstformen





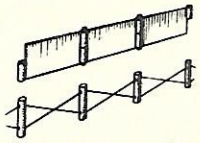
geführte Zwischenelektrode

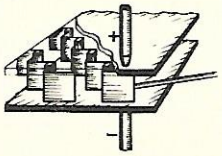




Haltezange

Bolzenband

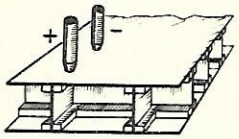




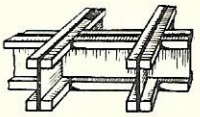
geführte Zangen – bzw. Zwischenelektrode

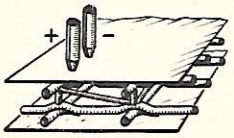
4. Stützrippen unter dünner Außenhaut

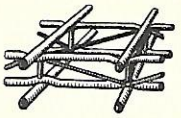
Aufbau / Verbindungsmöglichkeit

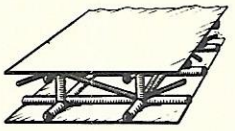


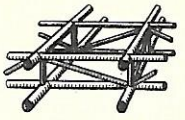
Stützgerüstformen

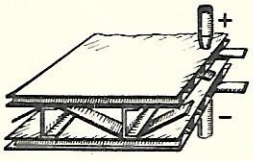










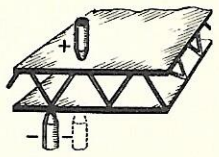


5. Stabwerk

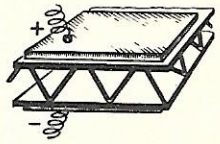
Aufbau

Verbindungsmöglichkeit

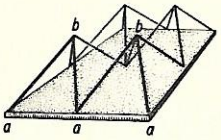
Stützgerüstformen

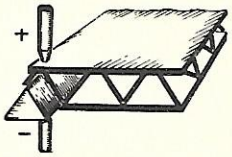


Einzelpunkt

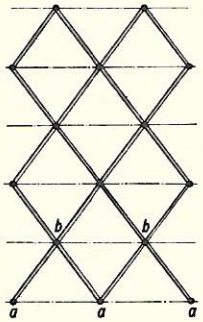


viele Punkte

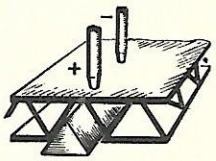




Stabeinlage
Einzelpunkt



Maschendraht in den Knoten abgeknickt



Stabeinlage
Doppelpunkt

2.6 Zusammenfassung

In der bisherigen Darstellung werden einige wichtig erscheinende Spezialentwicklungen des Leichtbaus herausgestellt und daraus Schlußfolgerungen für die Weiterentwicklung abgeleitet. Ein umfassenderes Gesamtbild vermittelt das bereits kurz behandelte Bild 2.1 (Seite 36).

Die in dem Bild 2.1 in Spalte (1) aufgeführten Tendenzen der Entwicklung beeinflussen die Bauweise (Spalte 2) und lösen damit Forderungen an die Baustoffentwicklung aus (Spalte 3). Die Arbeitsverfahren (Spalte 4) müssen folgen. Natürlich haben Baustoff- und Arbeitsverfahren-Entwicklung auch selbständige Tendenzen, die sich auf die Flugzeugentwicklung mit ihren Bauweisen fördernd auswirken.

Die Entwicklungsrichtung bezüglich der Bauweisen ist gegeben durch die ständige Forderung nach Gewichtseinsparung, die sich durch die Anwendung immer höher wertiger Baustoffe erreichen läßt. Immer bessere Ausnützung der Struktur der Werkstoffe durch Recken und Preßverfahren wird nötig. Die konische und keilige Ausführung der Elemente entsprechend den örtlichen Belastungen wird immer konsequenter gefordert. Großelemente und Integralbauweise vermindern die Mehrgewichte der Stoßverbindungen und gleichzeitig auch den Arbeitsaufwand, da sie eine Mechanisierung darstellen. Im Zusammenhang hiermit werden höhere Forderungen an die Formungs- und Verbindungsverfahren gestellt, die ebenfalls zur Mechanisierung führen.

Bezüglich der Werkstoffe ergibt sich als Folgerung aus dieser Entwicklung eine Steigerung der Festigkeitsansprüche. Homogenität und Oberflächengüte der immer härter werdenden Werkstoffe müssen bei höchster Dauerfestigkeit immer weiter gesteigert werden. Vergütung, Veredlung und Korrosionsschutz erfordern immer kompliziertere Verfahren und größere Anlagen. Die Formungsvorgänge lassen sich nur bei gewissen Werkstoffzuständen ausführen. Die Verbindungen müssen unter Gasabschluß oder im Vakuum geschweißt werden, damit höchste Reinheit und Festigkeit garantiert wird.

Die Entwicklungsrichtung der Arbeitsverfahren schaltet die bekannten handwerklichen Verfahren immer mehr aus und verlangt die

Durchführung der Formungs- und Verbindungsarbeiten in immer größeren Maschineneinheiten und Einrichtungen. Das Verhältnis der Arbeitsanteile der Formung und Spanung am gesamten Stundenaufwand verschiebt sich ständig unter dem Einfluß des Fortschritts der Bauweise. Insbesondere nimmt der Anteil der maschinellen Spanung bzw. der Abtragung zu. Eine weitere Formung der großen Halbzeuge, z.B. durch Preßverfahren, ist anzustreben. Die geringe Stückzahl bei großen Maschinen behindert diese Entwicklung zur Mechanisierung und Automatisierung, wie sie beispielsweise durch die Massenfertigung im Kriegsfall gegeben war, außerordentlich stark.