

**Manfred Meissner, Friedhelm Fischer,  
Klaus Wanke, Manfred Plitzko**

**Die Geschichte der Metallfedern und der  
Federntechnik in Deutschland**

**Die Autoren dieses Beitrags:**

**Dr.-Ing. habil. *Manfred Meissner***, Ilmenau  
(Gesamtbearbeitung, Geschichte der Federn und der Federberechnung)

**Dipl.-Ing. *Friedhelm Fischer***, Schwerte  
(Geschichte der Fahrzeugfedern, Warmformgebung, Chronik)

**Dipl.-Ing. *Klaus Wanke***, Chemnitz  
(Federwerkstoffe, Kaltformgebung)

**Dipl.-Ing. Betriebswirt (VWA) *Manfred Pitzko***, Iserlohn  
(Federnormung, Organisation)

unterstützt vom

***Verband der Deutschen Federnindustrie (VDFI) in Hagen,***

von der

***Forschungsgemeinschaft Gerätetechnik (FGG) e. V. Ilmenau,***

und vom

***Verein zur Förderung der Fakultät Maschinenbau und der  
Feinwerktechnik e. V. an der TU Ilmenau***



# Die Geschichte der Metallfedern und der Federntechnik in Deutschland

Manfred Meissner  
Friedhelm Fischer  
Klaus Wanke  
Manfred Pitzko



Universitätsverlag Ilmenau  
2009

## Impressum

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### **Universitätsverlag Ilmenau**

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

ISBN 978-3-939473-64-0 (Druckausgabe)

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2009100104

---

Titelfoto: Susanne Jakob / TU Ilmenau

## Vorwort

Die Geschichte der Federn zu bearbeiten, geht auf eine Anregung des damaligen Vorstandsvorsitzenden des Verbandes der Deutschen Federindustrie (VDFI), Herrn Dr. *Bernt Schroer*, zurück. Dieses Vorhaben wurde von Dr.-Ing. *Uwe Otzen* weiterverfolgt und 1996 an Dr. *Manfred Meissner* (TU Ilmenau) mit der Bitte um Bearbeitung angetragen. Dipl.-Ing. *Klaus Wanke* (Fa. Scherdel, Marktredwitz) erklärte sich zur Mitarbeit bereit. Ein Kurzbeitrag zu diesem Thema erschien dann 1999 in der Zeitschrift DRAHT anlässlich ihres 50-jährigen Bestehens.

Das nicht ganz einfache Vorhaben, die Geschichte der Federn unter Einbezug der Federntechnik zu erarbeiten, stellt die Autoren vor die Aufgabe, die in der Literatur zur Geschichte der Technik und der Technikwissenschaften nur vereinzelt vorzufindenden Hinweise zur Entwicklung des speziellen Maschinenelements FEDER aufzuspüren und aus Firmenschriften der Feder herstellenden Betriebe Deutschlands Angaben zur Technikentwicklung der Federherstellung zu entnehmen.

Die historische Entwicklung des Maschinenelements FEDER ist als Teil der Technikentwicklung im Zusammenhang mit den die Federn maßgeblich berührenden Technikzweigen zu behandeln. Da Federn Bauelemente sind, die in besonderem Maße die elastischen Eigenschaften von Werkstoffen nutzen, ist die Entwicklung der Federwerkstoffe untrennbarer Bestandteil ihrer Entwicklung. Die Funktion der Feder wird neben dem Werkstoff maßgeblich durch ihre Gestalt beeinflusst, so dass auch die Techniken zu ihrer Herstellung einzubeziehen sind. Für Konstruktion und Auslegung ist die Kenntnis und mathematische Beschreibung des Zusammenhangs von Federkraft, Federverformung und deren Auswirkung auf die Werkstoffbeanspruchung ausschlaggebend. Auch die Darlegung dieser Entwicklung, der Entwicklung der Federtheorie und ihrer Umsetzung für die Auslegungsrechnungen, ist als wichtiger Bestandteil der Entwicklungsgeschichte der Federn zu sehen.

Von Herrn Dipl.-Ing. *Friedhelm Fischer* (Schwerte) konnte ein umfangreicher Beitrag zur Geschichte der Fahrzeugfedern in Deutschland eingearbeitet werden, in dem auch die Entwicklung der Warmformgebung von Federn enthalten ist. Ausführungen zu Federwerkstoffen, zur Kaltformgebung der Federn und zur Entwicklung der Federberechnungen wurden als wesentliche Punkte der Geschichte der Federn aufgenommen. Ferner ist von Herrn Dipl.-Ing. Betriebswirt *Manfred Plitzko* ein Beitrag zur Geschichte der Normung von Federn aufgenommen worden.

## VI

Es ist verständlich, wenn sich die Autoren bei der Fülle des zu recherchierenden Stoffes auf den deutschsprachigen Raum beschränkt haben. Da verschiedene Quellen aber außerhalb Deutschlands lagen, musste auch das europäische Umland einbezogen werden.

Die Autoren danken dem VDFI und insbesondere Herrn Dr.-Ing. *Uwe Otzen* und Herrn *Thorsten Grawe* für die Unterstützung dieses umfangreichen Vorhabens. Viele Mitarbeiter der Fachgebiete Maschinenelemente und Konstruktionstechnik der TU Ilmenau, der Forschungsgruppe FEDERN und des Steinbeis-Transfer-Zentrums Federntechnik in Ilmenau haben die Arbeiten in vielfältiger Weise unterstützt, wofür die Verfasser sehr dankbar sind. Besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. *Kersten Liebermann*, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Hans-Jürgen Schorcht*, Frau Dr.-Ing. *Gunhild Chilian* und Frau *Heidi König* (Zeichnungen) für die Unterstützung bei der Vorbereitung des Manuskripts für den Druck.

Ilmenau, 30.09.2009

*Manfred Meissner*  
und Mitautoren

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Federn und Federntechnik vom Altertum bis zur Neuzeit</b> .....	<b>3</b>
2.1	Federn und Federwerkstoffe im Altertum .....	3
2.1.1	Die Anfänge der Nutzung der Werkstoffelastizität .....	3
2.1.2	Erweiterungen des Federeinsatzes durch die Waffentechnik .....	3
2.2	Entwicklung der handwerklichen Federfertigung im Mittelalter... 5	
2.2.1	Federanwendungen im Zeitraum des Mittelalters .....	5
2.2.2	Herstellung der Federn im Mittelalter .....	7
2.3	Entwicklungsgeschichte des Maschinenelements „Feder“ .....	8
2.3.1	Zum Begriff „Feder“ .....	8
2.3.2	Biegefedern .....	11
2.3.3	Verdrehfedern.....	11
2.3.4	Zug- und druckbeanspruchte Federn .....	12
<b>3</b>	<b>Entwicklung der Federwerkstoffe und Halbzeugherstellung</b> .. 13	
3.1	Federwerkstoffe und die Entwicklung ihrer Herstellungstechniken .....	13
3.1.1	Überblick.....	13
3.1.2	Zur Entwicklung von Federstahl .....	13
3.1.2.1	Allgemeines.....	13
3.1.2.2	Patentierete Drähte .....	14
3.1.2.3	Vergütete Drähte .....	15
3.1.2.4	Federbänder .....	17
3.1.3	Entwicklung von Stählen für warmgeformte Federn.....	17
3.1.4	Entwicklung anderer Federwerkstoffe.....	23
3.2	Halbzeugherstellung für Federn .....	26
3.2.1	Entwicklung der Techniken zur Federdrahtherstellung.....	26
3.2.2	Entwicklung der Techniken zur Federbandherstellung .....	28
3.3	Wärmebehandlungsverfahren.....	29
3.3.1	Härten und Anlassen härtbarer Stähle .....	29
3.3.2	Spannungsarmglühen (Anlassen) von Federn aus härtbaren Stahl- drähten .....	30
3.4	Verfahren zur Nachbehandlung der Federoberflächen.....	31
3.4.1	Kugelstrahlen .....	31

## VIII

3.4.2	Vorsetzen (Plastizierung).....	31
3.4.3	Korrosionsschutz kaltgeformter Federn.....	33

## **4 Neuzzeitliche Entwicklungen bei Federn und in der Federtechnik..... 35**

4.1	Federentwicklungen der Neuzeit .....	35
4.1.1	Biegebeanspruchte Federn (Biegefedern).....	35
4.1.1.1	Biegefedern aus Federband.....	35
4.1.1.2	Biegefedern aus Federdraht .....	36
4.1.1.3	Scheibenförmige Biegefedern (Tellerfedern) .....	37
4.1.1.4	Röhrs-Schraubentellerfeder .....	37
4.1.1.5	Biegefedern in Druckmessgeräten .....	38
4.1.2	Torsionsbeanspruchte Federn (Schraubenfedern).....	39
4.1.2.1	Allgemeines .....	39
4.1.2.2	Schraubendruckfedern .....	41
4.1.2.3	Schraubenzugfedern .....	42
4.1.2.4	Mehrdrahtschraubenfedern (Litzenfedern) .....	43
4.1.2.5	Drehstabfedern (Torsionsstabfedern).....	44
4.1.3	Zug- und druckbeanspruchte Feder (Ringfeder).....	45
4.1.4	Fahrzeugfedern .....	45
4.1.4.1	Blattfedern .....	47
4.1.4.2	Schraubendruckfedern .....	51
4.1.4.3	Drehstabfedern.....	53
4.1.4.4	Stabilisatoren .....	55
4.1.4.5	Gummifedern.....	56
4.1.4.6	Gasfederungssysteme .....	57
4.1.4.7	Kunststofffedern .....	59
4.2	Verfahren und Einrichtungen für die Warmformgebung von Fahrzeugfedern .....	60
4.2.1	Vorfertigung .....	60
4.2.1.1	Blattfedernvorfertigung .....	60
4.2.1.2	Schraubenfedernvorfertigung .....	65
4.2.1.3	Drehstabfedern- und Stabilisatorenvorfertigung.....	68
4.2.2	Formgebung und Vergütung .....	68
4.2.2.1	Blattfedern .....	68
4.2.2.2	Schraubenfedern .....	73
4.2.2.3	Drehstabfedern und Stabilisatoren .....	80
4.2.3	Nachbehandlungen .....	80
4.2.3.1	Blattfedern .....	81
4.2.3.2	Schraubenfedern .....	85

4.2.3.3	Stabfederelemente .....	88
4.3	Maschinen und Einrichtungen für die Kaltformgebung .....	89
4.3.1	Maschinen für die Herstellung von Schraubenfedern.....	89
4.3.2	Maschinen für die Herstellung von Formfedern aus Draht und Band.....	92
4.4	Einrichtungen für Federprüfungen .....	93
<b>5</b>	<b>Die Entwicklung der Auslegungsrechnungen von Federn .....</b>	<b>95</b>
5.1	Die Elastizität der festen Stoffe.....	95
5.1.1	Werkstoffelastizität und Federfunktion.....	95
5.1.2	Zum Begriff der Elastizität fester Stoffe .....	95
5.2	Die Herausbildung der Elastizitätslehre .....	97
5.2.1	Anfänge der Elastizitätstheorie.....	97
5.2.2	Der weitere Ausbau der Elastizitätstheorie.....	98
5.3	Entwicklung von Theorie und Praxis der Festigkeitslehre .....	101
5.3.1	Auswirkungen des Bauwesens .....	101
5.3.2	Formulierung wesentlicher Grundsätze der Festigkeitslehre.....	103
5.3.3	Die Weiterentwicklung der Festigkeitslehre im 18. und 19. Jahr- hundert .....	105
5.3.4	Die Frage nach den ertragbaren Werkstoffbeanspruchungen.....	109
5.4	Die Bach'sche Ära der Festigkeitslehre und der Maschinenele- mente .....	111
5.4.1	Kennzeichnung der Technikentwicklung im 19. Jahrhundert ....	111
5.4.2	Maschinenlehre und Konstruktionstechnik .....	114
5.5	Zur Entwicklung der Federberechnung .....	122
5.5.1	Das Anliegen einer Federberechnung.....	122
5.5.2	Vorgeschichte und die Ansätze von <i>Reuleaux</i> 1857.....	123
5.5.3	Die Arbeiten von <i>Grashof</i> und <i>Bach</i> .....	126
5.5.4	Weiterentwicklung der Federberechnungen 1888 durch <i>Castigli- ano</i> .....	127
5.5.5	Von <i>Castigliano</i> bis <i>Gerolsky</i> – Publikationen zu Federproble- men (1888 – 1918) .....	129
5.5.6	Neue Federarten, ihre Berechnung und die Weiterentwicklung der Berechnung von Schraubenfedern Anfang des 20. Jahrhun- derts .....	134
5.5.7	Beiträge von <i>Gross</i> und <i>Lehr</i> zur Federberechnung Mitte des 20. Jahrhunderts .....	138
5.5.8	Normen zur Berechnung von Federn.....	140
5.6	Die Entwicklung der Auslegungsrechnungen für Federn in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts bis zur Gegenwart .....	143

5.6.1	Einzelfederberechnungen .....	143
5.6.2	Schwingungsverhalten und Dauerschwingfestigkeit .....	145
5.6.3	Rechnerunterstützter Federentwurf (Rechnereinsatz in der Federntechnik) .....	148
5.7	Zusammenfassung .....	149
<b>6</b>	<b>Die Entwicklung der deutschen Normung für Federn .....</b>	<b>155</b>
6.1	Anfänge der deutschen Normung .....	155
6.1.1	Vorstufen .....	155
6.1.2	Die Gründung des Deutschen Normenausschusses .....	157
6.2	Der Arbeitsausschuss Federn.....	159
6.2.1	Gründung des Arbeitsausschusses Federn (AF) .....	159
6.2.2	Arbeitsprogramm des Arbeitsausschusses Federn.....	159
6.3	Ergebnisse der Normungsarbeit auf dem Gebiet der Federn .....	161
6.3.1	Die ersten Normen über Federn.....	161
6.3.2	Normen zu Federwerkstoffen und Halbzeugen .....	165
6.3.3	Normen für Blattfedern und Zubehör .....	165
6.4	Die deutsche Normungsarbeit in der Mitte des 20. Jahrhunderts	168
6.5	Europäische und internationale Normungsarbeit im VDFI .....	185
6.6	Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) – DDR- Standards .....	189
6.7	Die Vorsitzenden (Obmänner) des Arbeitsausschusses Federn..	194
6.8	Ausblick.....	195
6.8.1	Nutzen der Normung .....	195
6.8.2	Normung im Wandel .....	198
<b>7</b>	<b>Die Entwicklung der deutschen Federnindustrie.....</b>	<b>201</b>
7.1	Überblick .....	201
7.2	Die handwerklichen Quellen der Federherstellung.....	201
7.2.1	Das Schmiedehandwerk.....	201
7.2.2	Das Schlosserhandwerk und andere metallverarbeitenden Hand- werke .....	202
7.2.3	Das Uhrmacherhandwerk .....	203
7.3	Ausgewählte Firmenchroniken als Beispiele für die Entwick- lung der deutschen Federnindustrie.....	206
7.3.1	Metallerschmelzung und Schmiede.....	206
7.3.1.1	Brüninghaus in Verdohl .....	206
7.3.1.2	J. P. Grueber in Hagen .....	207
7.3.1.3	Hoesch-Federn in Hagen.....	209



7.2.3	Drahtzieher und Drahtverarbeitung.....	211
7.3.2.1	Ahle Federn in Karlsthal.....	211
7.3.2.2	Scherdel GmbH in Marktredwitz.....	212
7.3.2.3	WAFIOS AG in Reutlingen.....	213
7.3.3	Schlosser und Maschinenbau.....	214
7.3.3.1	Johann Vitz GmbH & Co. KG in Velbert.....	214
7.3.3.2	Dr. Werner Röhrs KG in Sonthofen.....	214
7.3.4	Uhren- und Feinwerktechnik.....	216
7.3.4.1	Hugo Kern und Liebers GmbH & Co. KG in Schramberg.....	216
7.3.4.2	Gebr. Schmidt GmbH in Wuppertal.....	217
7.3.4.3	Federnfabrik Dietz GmbH in Neustadt.....	218
7.4	Verband der deutschen Federnindustrie (VDFI).....	219
7.5	Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Metallfedern und der Federntechnik.....	222
7.6	Zusammenfassung.....	233
<b>8</b>	<b>Literatur und wichtige Patente.....</b>	<b>235</b>
8.1	Literatur.....	235
8.2	Patente.....	262
8.3	Bildquellen.....	263
	<b>Personenverzeichnis.....</b>	<b>265</b>

## **Abkürzungen**

- AF**      Arbeitsausschuss Federn
- AFV**     Autofedern-Vereinigung
- DIN**     Deutsche Industrie Normen
- DNA**     Deutscher Normenausschuss
- ESV**     Eisendraht- und Stahldraht-Vereinigung
- FVF**     Fachverband Federn
- FV-KF**   Fachvereinigung Kaltgeformte Federn
- FV-WF**   Fachvereinigung Warmgeformte Federn
- MKS**     Mehrkörper-Simulation
- MPIE**    Max-Planck-Institut für Eisenforschung
- NA-F**    Normenausschuss Federn
- ThMfKW** Thüringer Ministerium für Kunst und Wissenschaft
- TMWFK** Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
- VDEh**    Verein Deutscher Eisenhüttenleute/Verband des Deutschen Eisenhüttenwesens
- VDFI**    Verband der Deutschen Federnindustrie
- VDFI-FF**    Verband der Deutschen Federnindustrie – Fachvereinigung Fahrzeugfedern
- VDFI-KF**    Verband der Deutschen Federnindustrie – Fachvereinigung Kaltgeformte Federn
- VDI**     Verein Deutscher Ingenieure

# 1 Einleitung

Schon in der Frühzeit der Menschheitsgeschichte hat man von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, die elastische Verformung der von der Natur gegebenen Materialien zur Speicherung und Abgabe von Arbeit zu verwenden. Federnde Bogen wurden bereits in der Altsteinzeit für Jagdzwecke genutzt. Die Form der Energiespeicherung im gespannten Bogen ist dann später in der Armbrust, im Katapult und in der Wurfmaschine, die bei kriegerischen Auseinandersetzungen verwendet wurden, weiterentwickelt worden.

Neben der Waffentechnik führte im Mittelalter die vielseitige handwerkliche Tätigkeit zu zahlreichen Entwicklungen verschiedener Federarten und Federformen, die in Schlössern, Uhren und Maschinen Antriebs- und Teilerückstellaufgaben zu erfüllen hatten. Für diese Aufgaben wurden in dieser Zeit fast ausschließlich metallene Federn eingesetzt.

Einhergehend mit der Entwicklung des Maschinenbaus und der Fahrzeugtechnik im 18. und 19. Jahrhundert setzte auch die Entwicklung der Federntechnik als selbständiger Zweig des Maschinenbaus ein. Den Anforderungen der Technik gemäß erfolgte auch eine ständige Weiterentwicklung der Werkstofftechnik, insbesondere der Stahlerzeugung und -verarbeitung.

Die Feder als Element vieler Maschinen, Geräte und Einrichtungen ist in ihrer Entwicklung eng mit der Entwicklung der Metalltechnik (Werkstofftechnik, Halbzeugherstellung) und der Entwicklung der Federfertungsverfahren verbunden. Eine dritte, wesentliche Säule der Federntechnik, der Entwurf und die Berechnung der Federn unter Anwendung der Erkenntnisse der Elastizitäts- und Festigkeitslehre, spielte erst in den letzten 150 Jahren eine immer bedeutsamer werdende Rolle [1.5][1.6].

Auf diese genannten Schwerpunkte der geschichtlichen Entwicklung des heutigen Maschinenelements „Feder“ wird in diesem Beitrag eingegangen. Neben der Historie werden vor allem auch neuzeitliche Entwicklungen des Maschinenelements „Feder“, die wesentlichen Entwicklungen der Federwerkstoffe, der Verfahren der Federherstellung mit Vor- und Nachbehandlungen und der Berechnung und Konstruktion behandelt. Einen größeren Raum nehmen dabei vor allem Verfahren, Maschinen und Einrichtungen der Federfertigung ein, die unter dem Sammelbegriff „Federntechnik“ abgefasst werden. Die Darlegungen beschränken sich auf die Darstellung der Entwicklung der Federntechnik in Deutschland. Diese kann natürlich nicht losgelöst von der Technikentwicklung vor allem in Europa gesehen werden. Dabei spielen drei technische Errungenschaften des 18. und 19. Jahrhunderts, die Entwicklung der Verfahren der Eisen- und Stahlerzeugung (Bessemer-, Thomas- und Siemens-Martin-Verfahren), die Erfindung der

Dampfmaschine und der Dampflokomobile (Watt, Stephenson) und der Beginn der Automobilherstellung durch *Karl Benz* (Erfindungen von *Otto* und *Daimler*) eine wesentliche Rolle.

Die meisten Federn der umfangreichen Produktpalette werden durch eine Kaltformgebung gefertigt. Warmgeformte Stahlfedern sind, abgesehen von einigen kaltgeformten Schraubendruckfedern geringerer Drahtabmessungen, die klassischen Tragfedern im Fahrwerk von Straßenfahrzeugen und im Laufwerk von Schienenfahrzeugen. Sie werden im Beitrag global als Fahrzeugfedern im Zusammenhang mit der Beschreibung der Verfahren zur Warmformgebung abgehandelt.

Warmgeformte Federn für den Lokomotiv- und Waggonbau bildeten im 19. Jahrhundert wohl den Ausgangspunkt für die Errichtung spezieller Abteilungen für Federproduktionen in existierenden Fabriken der Metallverarbeitung oder die Gründung von Federwerken. Dabei ist zu verzeichnen, dass jede durchsetzungsfähige Erfindung einen mehr oder weniger großen Zeitraum bis zur Herstellung größerer Stückzahlen benötigte. Auch der Automobilbau in Deutschland kam Anfang des 20. Jahrhunderts noch mit geringen Stückzahlen an Federn aus. Aus [1.4] geht hervor, dass es 1913/1914 in Deutschland zwar schon 109 Automobilfabriken gibt, aber erst 93000 zugelassene Kraftfahrzeuge registriert sind. Zehn Jahre später hat sich die Zahl zugelassener Kraftfahrzeuge in Deutschland verdreifacht, jedoch in den USA sind um diese Zeit bereits knapp 20 Millionen registriert [1.1]. Dort produzierte FORD von 1908 bis 1927 allein mehr als 15 Millionen Stück des legendären T-Modells, das um diese Zeit mehr als die Hälfte des Weltbestands an Kraftfahrzeugen ausmacht [1.2]. In Deutschland setzte eine ähnliche Entwicklung erst nach dem 2. Weltkrieg ein. Der große Nachholbedarf an Kraftfahrzeugen in Deutschland wird aus dem Zahlenvergleich der zugelassenen Automobile im Jahre 1947 deutlich [1.3]: USA 38.883.000, GB 2.678.000, Kanada 1.786.000, Frankreich 1.640.000 und Deutschland 371.000.

Bei der Darlegung der Geschichte der Fertigungsstätten von Federn konnte auf eine Reihe von Quellen zurückgegriffen werden, die in verschiedenen Firmenschriften enthalten waren. Vielfach fehlen jedoch Unterlagen, so dass die Geschichte der Federn produzierenden Firmen nicht lückenlos bearbeitet werden konnte.

## 2 **Federn und Federntechnik vom Altertum bis zur Neuzeit**

### 2.1 **Federn und Federwerkstoffe im Altertum**

#### 2.1.1 **Die Anfänge der Nutzung der Werkstoffelastizität**

Die *Feder* kann wohl neben Hebel und Rad als eines der ältesten Maschinenelemente angesehen werden, obwohl die Bezeichnung "Feder" erst jüngeren Datums sein dürfte. Den geschichtlichen Überlieferungen ist zu entnehmen, dass die elastischen Eigenschaften des *Holzes* und später auch anderer Naturstoffe schon recht früh erkannt wurden. Man nutzte diese Eigenschaften vor allem für allgemeine Antriebszwecke, wobei wohl zunächst Anwendungen zum Nahrungserwerb im Vordergrund standen.

Aus Naturbeobachtungen erkannte man, dass Holz federt. Diese Eigenschaft des ersten Federwerkstoffs "Holz" wurde zunächst für federnde Bogen ausgenutzt, wobei man sich auf die von der Natur an Bäumen und Sträuchern vorgegebenen Formen und Querschnitte beschränkte. Funde von Pfeilspitzen erlauben die Annahme, dass in der Altsteinzeit Pfeil und Bogen bereits für Jagdzwecke genutzt wurden. *Holzbogen* aus Eibe mit einer Länge von etwa 1,5 m fand man im Pfahlbau zu Robenhausen am Pfäffiker See in der Schweiz. Sie stammen aus einem Zeitraum von 4000 - 3000 vor der Zeitrechnung [2.4][2.6][2.13].

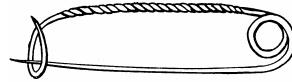
Holz und Horn blieben einige Jahrtausende die einzigen Federwerkstoffe. In den Anfängen der Nutzung suchte man zweckentsprechende Formen und setzte sie in dem durch die Natur gegebenen Zustand ein. Mit der Zeit lernte der Mensch das vorgefundene Material zu noch günstigerer Gestalt umzuformen. Runde *Formfedern* aus Holz wurden beispielsweise in Tierfallen eingesetzt, wie der Fund einer Otterfalle (Zeitraum etwa 1000 vor der Zeitrechnung) in der Mark Brandenburg zeigt [2.4][2.13].

#### 2.1.2 **Erweiterungen des Federeinsatzes durch die Waffentechnik**

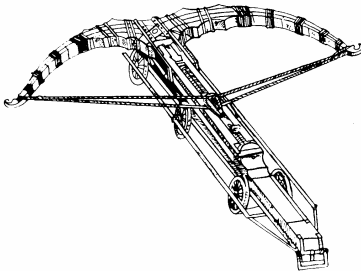
Durch den Einsatz von *Metall* in der Bronze- und Eisenzeit nahm die Kunst der Formgebung einen schnellen Aufschwung. Gewandnadeln in vielfacher Gestalt wurden in Grabstätten gefunden. **Bild 2.1** zeigt ein Beispiel. Mit fortschreitender Menschheitsentwicklung ist jedoch vor allem ein zunehmender Einsatz von Federn in der Waffentechnik zu verzeichnen. Gerade

aus der Waffentechnik sind zahlreiche Beispiele von Federanwendungen bekannt, weil Kriege von jeher auffällige und dramatische Ereignisse gewesen sind, denen Berichterstatter jeder Art große Aufmerksamkeit schenkten.

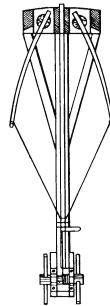
**Bild 2.1.** Federelemente an einer Gewandnadel



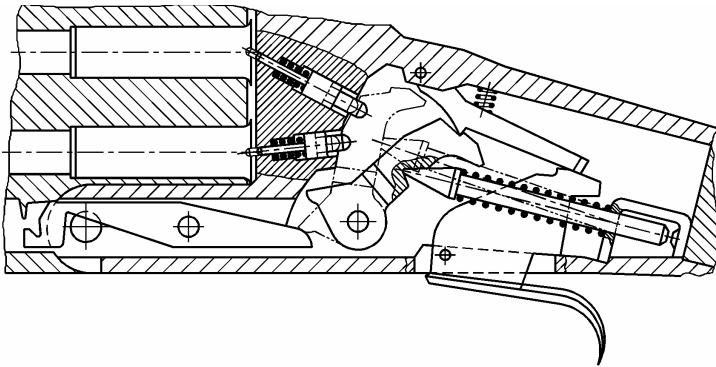
Die Form der Energiespeicherung im gespannten Bogen wurde in der Armbrust, im Katapult und in der Wurfmaschine weiterentwickelt. Beispiele zeigen die **Bilder 2.2** und **2.3**. Bei der als ein Geschütz aufgebauten Armbrust in Bild 2.2 werden geschichtete Blattfedern aus Holz verwendet. Im komplizierten Federsystem einer Wurfmaschine (Bild 2.3) findet man wahrscheinlich die zu dieser Zeit größtmögliche Energiespeicherung. Der Gebrauch solcher Wurfmaschinen ist aus zahlreichen geschichtlichen Quellen bekannt. Beispielsweise verwendeten die Verteidiger von Syrakus (214 - 212 v. d. Z.) bei der Belagerung durch die Römer von *Archimedes* entworfene und gebaute Wurfmaschinen hoher Präzision und Schleuderkraft, durch die die Angreifer schließlich in die Flucht geschlagen wurden.



**Bild 2.2:** Armbrust-Geschütz mit geschichteten Blattfedern aus Holz [2.4][2.6][2.9]



**Bild 2.3:** Federn in einer Wurfmaschine [2.4][2.6][2.9]



**Bild 2.4:** Federn im Schloss- und Abdrückmechanismus von Jagdwaffen der Neuzeit

## 2.2 Entwicklung der handwerklichen Federfertigung im Mittelalter

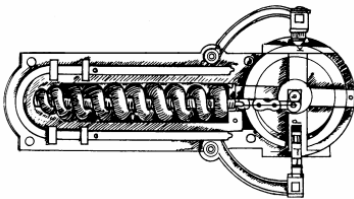
### 2.2.1 Federanwendungen im Zeitraum des Mittelalters

Die Entwicklung der Waffentechnik hat sich zusammen mit den Fortschritten der Metalltechnik im Mittelalter zunächst am stärksten auf die Federtechnik ausgewirkt. Markante Veränderungen in Konstruktion und Gebrauch der Waffen sind mit der Erfindung des Schießpulvers durch *B. Schwarz* (um 1300 n. d. Z.) verbunden. Bemerkenswert ist, dass sich flache, geschmiedete oder geformte Federn in den verschiedensten Handfeuerwaffen für Abzug, Gaskammer und Hahn in der gleichen allgemeinen Ausführung bis heute erhalten haben. In **Bild 2.4** ist der Abdrück- und Schlossmechanismus mit den verschiedenartigsten Federn gezeigt, wie er in Jagdwaffen der heutigen Zeit vorzufinden ist.

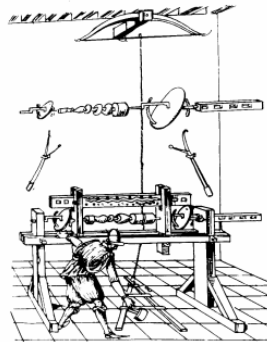
Neben der Waffentechnik führte im Mittelalter die vielseitige handwerkliche Tätigkeit der Schlosser und Schmiede zu zahlreichen Entwicklungen verschiedener Federarten und Federformen, die vor allem in Schlössern, Uhren, Zuhaltmechanismen an Truhen und Behältnissen Antriebs-, Zuhalte- und Teilerückstellaufgaben zu erfüllen hatten. Über den Einsatz von Federn in Handelswaren oder für häusliche Zwecke ist bis gegen Ende des 15. Jahrhunderts wenig bekannt. Aus verschiedenen Funden geht hervor, dass Federelemente an aus Draht geformten Gegenständen, wie Schmuck-

teilen oder Gewandnadeln, vorhanden waren. Solche Nadeln, ähnlich der in Bild 2.1 gezeigten, wurden aus Kupfer oder Messing gefertigt, indem ein Drahtstück durch Hämmern hergestellt und entsprechend gebogen wurde, bis ein federndes Befestigungselement entstand. Vielfach wurden Ösen und Windungen angebracht, so dass die Federelemente dieser Nadeln die Form einer Drehfeder, ähnlich der heute gebräuchlichen Sicherheitsnadel, erhielten.

Schlösser gibt es schon seit vielen hundert Jahren. Eine hölzerne Ausführung, als Urform des Zylinderschlusses geltend, ist ägyptischer Herkunft. Sie wurde in den Ruinen der assyrischen Stadt Ninive entdeckt. In Schlössern findet man vor allem Blatt- und Spiralfederformen. Sie hatten Zuhalte-, Sperr- und Rückstellaufgaben zu erfüllen. Einfache, aber oft auch recht komplizierte Zuhalte- und Sperrmechanismen (Schnappverschlüsse) findet man an Truhen, Schatullen, Tabakdosen und anderen Behältnissen. Für diese Funktionen setzte man vorwiegend Blattfedern gerader oder gekrümmter Form ein. In vielen Museen sind derartige Schlossmechanismen an mittelalterlichen Einrichtungsgegenständen zu sehen.



**Bild 2.5:** Radschlossmechanismus mit Schraubenfeder von *Leonardo da Vinci* entworfen [2.6][2.9][2.13]



**Bild 2.6:** Antrieb einer Drehmaschine unter Verwendung einer Blattfeder [2.9]

Viele Konstruktionen, in denen Federn in irgendeiner Form als Antriebs-elemente eingesetzt wurden, stammen von *Leonardo da Vinci* (1452 - 1519). Er entwickelte ein Motorfahrzeug mit Spiralfederantrieb, einen Rad-schlossantrieb (**Bild 2.5**), einen Flugapparat, bei dem verschiedene Blattfe-derformen vorgesehen waren, experimentierte mit Uhren und deren Antrie-



ben und entwarf ein automatisches Schloss mit einer schraubenförmigen Feder [2.9]. **Bild 2.6** zeigt beispielsweise den Einsatz einer Blattfeder zum Antrieb einer Drehmaschine zum Dreheln von Holz.

### 2.2.2 Herstellung der Federn im Mittelalter

Die zahlreichen Ideen von *L. da Vinci* sind seiner Zeit in Bezug auf die Möglichkeiten einer technischen Umsetzung weit voraus, da neben werkstofflichen Problemen vor allem die fertigungstechnische Realisierung Schwierigkeiten bereitete. Verfolgt man die Entwicklung des Uhrmacher- und Schlosserhandwerks vom Mittelalter bis zur Neuzeit, dann stellt man fest, dass besonders durch diese Handwerker zahlreiche Federformen entwickelt wurden, die auch heute noch verwendet werden (Spiralfeder, Haarfeder, Blatt-Formfeder).

So lässt sich sagen, dass Federn bis ins 19. Jahrhundert handwerklich von Schmieden, Schlossern und Uhrmachern hergestellt wurden. Über die Existenz einer eigenen *Federmacherzunft* gibt es zu keiner Zeit irgendeinen Hinweis [2.4]. Ohne Zweifel verstanden es Schmiede, aber auch andere Handwerker, schon recht frühzeitig, durch Hämmern den Federn nicht nur die Form, sondern auch ihre besonderen federnden Eigenschaften zu verleihen. Aus in [2.4] angeführten alten Quellen geht hervor, dass *Blattfedern* schon im 3. Jahrhundert v. d. Z. von *Ktesibios* in Erzschnitzgeschützen verwendet wurden. Zur Herstellung dieser Federn wird aus dieser Quelle zitiert: "Blattfedern werden aus bestens zubereitetem, gut gereinigtem und mehrmals geschmolzenem Kupfer, dem 3% Zinn beigemischt sind, gegossen und ausgeschmiedet. Darauf gibt man ihnen auf einer hölzernen Unterlage eine leichte Krümmung, und nach dem sie kalt geworden sind, behandelt man sie längere Zeit mit dem Hammer ... ."

Zur Prüfung dieser Federn, insbesondere ihrer Federungseigenschaften, wird an anderer Stelle ausgeführt: "Die Kunst der Herstellung genannter Federn ist aber aus den keltischen und spanischen Schwertern ersichtlich, denn wenn man diese erproben will, ob sie gut sind, ergreift man sie mit der rechten Hand, legt sie auf den Kopf und drückt die seitwärts befindlichen beiden Enden herab, bis sie die Schultern berühren. Dann aber lässt man sie los, indem man beide Hände in die Höhe hebt. Das losgelassene Schwert aber wird wieder gerade und so in seinen ehemaligen Zustand zurückversetzt, dass es keine Spur von Biegung erhält. Und wenn man dies noch so oft tut, bleiben die Schwerter doch gerade."

Aus diesen Zitaten ist ersichtlich, dass bereits seit dem Altertum eine hohe Technik bei der Herstellung von Federn zu verzeichnen war, die auch heute

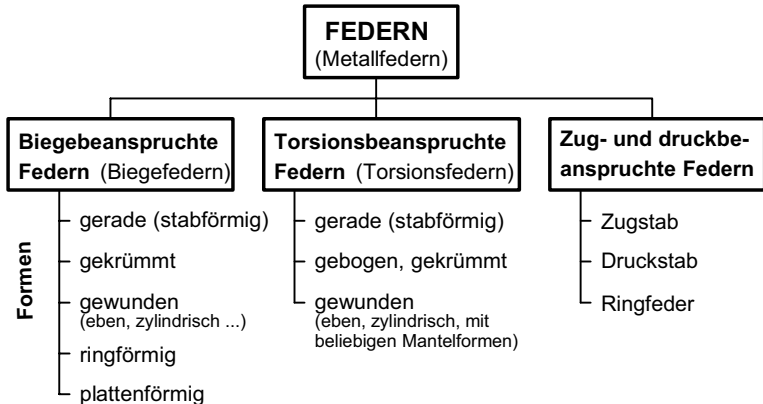
noch mit den Verbesserungen und Verfeinerungen infolge der Technikentwicklung die Basis für die Federfertigung bildet.

## 2.3 Entwicklungsgeschichte des Maschinenelements "Feder"

### 2.3.1 Zum Begriff "Feder"

Wann sich der Begriff "Feder" für ein Bauelement mit besonderen elastischen Eigenschaften eingebürgert hat, kann heute nicht genau gesagt werden. Elastische Eigenschaften von Naturstoffen werden zwar schon sehr lange genutzt, doch ist anzunehmen, dass sich ein spezieller Begriff "Feder" erst später im Zuge der Anwendungen solcher Bauelemente in der Waffentechnik und der Verwendung als Verschlusshilfen (Vorläufer der Schlösser) bei Schatullen, Truhen und anderen Behältnissen gebildet hat. Als Maschinenelement hat sich dieser Begriff erst im 17. bis 18. Jahrhundert mit der Entwicklung der Maschinenteknik (Erfindung der Dampfmaschine) und des gleichnamigen Fachgebietes herausgebildet.

In älteren Fachbüchern werden Federn nicht unter dem Oberbegriff "Maschinenteile" [2.7], sondern unter dem Abschnitt "Festigkeitslehre" behandelt [2.7][2.1][2.2][2.5]. Dieser Umstand resultiert sicher daraus, dass die theoretischen Grundlagen für die mathematische Behandlung dieses Elements aus der Elastizitätslehre abgeleitet wurden, die auf *L. da Vinci*, *G. Galilei* und vor allem auf *Robert Hooke* (1635 - 1703) zurückgehen. Damit dürfte auch die Ableitung des eigentlichen Begriffs "Feder" auf diese Verbindung zurückzuführen und als Ursprung des heutigen Maschinenelemente-Begriffs "Feder" das Mittelalter anzusehen sein, obwohl bereits bei *Philon* von *Byzanz* (etwa 230 v. d. Z.) in seinem Buch "Mechanike syntaxis" dieser Begriff verwendet und in der heutigen Übersetzung so gedeutet wird. Die folgenden Ausführungen sollen noch einmal die Entwicklung des Bauelements "Feder" in der heute üblichen Einteilung nach den Beanspruchungen des Federwerkstoffs zusammenfassend darstellen. Diese Einteilung, die seit über 150 Jahren in allen Publikationen so verwendet wird, veranschaulicht **Tafel 2.1**, während **Tafel 2.2** eine Zusammenstellung der Entwicklungsgeschichte der Federn enthält.

**Tafel 2.1.** Einteilung der Maschinenelemente-Gruppe „Metallfedern“**Tafel 2.2.** Entwicklungsgeschichte der Federn (Übersicht) [2.4][2.6][2.9][2.11][2.13]

<b>Zeit/Zeit- raum</b>	<b>Federart</b>	<b>Verwendung/Bemerkungen/spezielle Quellenhinweise</b>
<b>vor der Zeitrechnung</b>		
4000 - 3000 um 1400	<u>Biegefeder</u> Biegefedern, gerade und gewunden	Federnde Bogen aus Holz für Jagd Zwecke; Gewandnadeln, Schmuckgegenstände (Verwendung von gehämmertem Bronzedraht);
um 1000	Biegefedern, gerade	Holzfedern in Otterfallen (Kreis- und Rechteckquer- schnitt);
800 - 200	<u>Blattfedern</u> , einzeln und geschichtet; <u>Torsionsfedern</u> (auch Torsionsbän- der)	Für Formen der Energiespeicherung in Schleudern, Katapulten, Armbrüsten und Wurfmaschinen, wobei man auch verdrehte Tiersehnen, Frauenhaar und andere Werkstoffe nutzte. <u>Hinweise dazu:</u> <i>Uzziah</i> (808-756) in der Bibel; <i>Alexan- der der Große</i> (356-323); <i>Philipp von Mazedonien</i> (383-336); <i>Archimedes</i> (287-212, Einsatz einer Wurf- maschine bei der Belagerung von Syrakus durch die Römer); <i>Philon von Byzanz</i> (2. Hälfte 3. Jhd. v. d. Z.): Mechanik, Buch 4, Kap. 43 und 46; <i>Usher</i> : Geschichte der mechanischen Erfindungen, 1929.

**Tafel 2.2.** Entwicklungsgeschichte der Federn (Übersicht) [2.4][2.6][2.13][2.11][2.9] (Forts.)

Zeit/Zeitraum	Federart	Verwendung/Bemerkungen/spezielle Quellenhinweise
nach der Zeitrechnung		
800 - 1400	Biegefedern  Biegefedern, gerade und gekrümmt; <u>Flachformfedern</u>	Blattfedern aus Holz und Eisen für Armbrüste und Drückermechanismen an Waffen (Hinweise: Berichte von der Schlacht bei Crécy, 1346); Rad-Zündschloss u. Drückermechanismen an Waffen (Verw. von Radschlossgewehren bis gegen 1700); Einsatz für Schnappverschlüsse an Behältnissen wie Schmuckkästchen, Schnupftabakdosen, Truhen;
1400 - 1600	<u>Spiralfedern</u> , <u>Schraubendruckfedern</u> , Biegefedern;	Uhren, Radschlossantriebe, Antriebsf. f. Flugappar., Stanzpressen für die Münzherstellung, versch. Mechanismen. Erfindungen von <i>L. da Vinci</i> (1452-1519)
1429 - 1435	Spiralfeder	Verwendet in einer Uhr v. <i>P. Lombert</i> in Mons/Belg.
1511	Spiralfeder	Uhrenbau durch <i>P. Henlein</i> (1480-1542) in Nürnberg
1517	Spiralfeder	Radschloss mit Spiralfeder, Erfindung in Nürnberg
1565	Blattfeder	Federbogen z. Antrieb v. Drehmaschinen (s. B. 2.6)
1595	Blattfeder, gekrümmt	Wagenfeder von <i>Veranzio</i> beschrieben
1658	Blattfeder, Haarfeder	Hemm- und Ausgleichswerke in Uhren d. <i>R. Hooke</i> (1635-1703) und <i>Th. Thomson</i> (1639-1713) gebaut
1674	Spiralfeder	Unruhfeder von <i>Chr. Huygens</i> (1629-1695)
1703	Schraubendruckfedern	In Metallrohren geführte Schraubendruckfedern für Wagenfederungen von <i>Thomas</i> entworfen u. gebaut
1702, 1844	<u>Membranfeder</u>	Aneroid-Barometer v. <i>Leibniz</i> (Idee) und <i>Vidie</i> (Bau)
1726	Druck- und -zugfeder	Federwaage von <i>J. Leupold</i> (deutsches Patent)
1819	Ringförmige Biegefeder	Federwaage von <i>A. Siebe</i> (englisches Patent)
1838	Spiralfeder aus Draht	Federwaage von <i>G. Salter</i>
1844	<u>Kegelstumpffeder</u>	Pufferfeder aus Federband von <i>Baille</i> entwickelt
1849	<u>Bourdon-Feder</u>	Gebogenes Rohr für Aneroid-Barometer von <i>Bourdon</i> entwickelt
1861	<u>Tellerfeder</u>	Patent über eine Feder mit der Gestalt einer kegelförmigen Ringschale von <i>Julien-Francoise Belleville</i>
1878	Spiralfeder	Federmotorantrieb für Nähmaschinen, Entwicklungen von <i>Schreiber</i> und <i>Salomon</i> (Wien), <i>Günzburger</i> (St. Denis) sowie <i>Perrier</i> (Paris)
1920	<u>Ringfeder</u>	Kegelförmig bearbeitete Ringe, wechselseitig geschichtet, Erfindung von <i>E. Kreissig</i>
1936	Tellerfeder	Theorie d. Tellerfeder, Berechn. von <i>Almen</i> u. <i>Lászlo</i>
1939	Torsionsf. a. Drahtlitze	Patentanmeldung durch <i>Werner Röhrs</i>
1945	<u>Rollfeder</u>	Negator-Feder von <i>Forster</i> (USA) entwickelt
1972, (1935)	Schraubenzugfeder, <u>hifo®-Zugfeder</u> , <u>-Haken</u>	Nach einem besonderen Verfahren mit großer Vorspannung gewickelte Schraubenzugfeder mit spezieller Hakenform, Patente von <i>J. Huhnen</i>
1979	<u>Schraubenförmige Tellerfeder</u>	Schraubenförmig aus speziell geformtem Federband doppelagig gewickelte Druckfeder (Schraubenförmige Tellerfeder), Patent von <i>Dr. Röhrs</i>

### 2.3.2 Biegefedern (Biegebeanspruchte Federn) [2.4][2.13]

Als älteste Form ist die *Biegestabfeder* anzusehen, die zum Bogen gespannt für das Abschießen von Pfeilen verwendet wurde. Die Urform der *Drehfeder* (Schenkelfeder) findet man an Gewandnadeln (Bronzezeit, etwa 2000 v. d. Z.), den sogenannten Fibeln (s. Bild 2.1), die aus Drähten gefertigt wurden, wobei das "gelenkige" Ende der Nadel etwa zwei bis vier schraubenförmig angeordnete Windungen aufweist. Ebenfalls in der Bronze- und weiter in der Eisenzeit sind *Blattfedern*, die man in der Waffentechnik einsetzte, nachweisbar. Erst später werden diese (auch Drahtfedern) gebogen bzw. gekrümmt und zum Teil auch schon mit einzelnen Windungen versehen in Zuhaltungen und Schlössern an Behältnissen (Truhen, Schatullen) verwendet. Schließlich werden Blattfedern auch zu Spiralen mit mehreren Windungen geformt, die als *Spiralfedern* bezeichnet werden und vornehmlich für die Uhrentechnik entwickelt wurden.

*Scheibenförmige Biegefedern* werden in Aneroid-Barometern erstmals als Bauelemente für die Kraft-Weg-Umsetzung genutzt, obwohl diese Federart bereits ihren Ursprung in der Trommel (mit Fell/Leder bespannte Zylinder aus Holz) haben dürfte.

Die heutige Vielfalt der Formen von stabförmigen, gekrümmten, gewundenen als auch scheibenförmigen Biegefedern hat sich aus den genannten Grundformen unter Anpassung an die verschiedensten Aufgaben und konstruktiven Erfordernisse entwickelt.

### 2.3.3 Verdrehfedern (Torsionsbeanspruchte Federn) [2.4][2.13]

Für diese Federart wurden im Altertum nichtmetallische Stoffe, meist in Streifen geschnittene Häute, Tierschnen, Haare und Pflanzenfasern verwendet. Diese wurden beiderseits entsprechend gefasst (verdreh sicher fest eingespannt), wobei dann ein Ende gegenüber dem anderen verdreht wurde. Diese Art *Torsionsfeder* setzte man in Wurf- und Schleudereinrichtungen (s. Bild 2.3) ein, wobei sie meist in der Kombination mit Biegefedern zur Wirkung gebracht wurde.

*Schraubendruckfedern* findet man erstmals in Skizzen und Zeichnungen von *Leonardo da Vinci* (s. Bild 2.5 und [2.9]).

Eine *Kegeldruckfeder* (Kegelstumpffeder) in Form eines mit Steigung gewickelten Federbandes wurde erstmals 1844 von *Baille* als Pufferfeder an Eisenbahnwaggons eingesetzt.

Verschiedene Formen von *Schraubendruckfedern* aus Draht wurden von *Jacob Leupold* (1726) und *Georg Salter* (1838) für den Bau von Waagen verwendet. Es ist anzunehmen, dass im Zuge dieses Einsatzes derartige Federn auch "gezogen" wurden und somit Schraubenfedern auch als *Zugfedern* gebraucht worden sind. In diesem Zusammenhang ist zu vermerken, dass 1928 auf der britischen Industriemesse in Birmingham von der Firma G. Salter & Co. eine Federwaage für eine Last von 100 t ausgestellt wurde, bei der zwei Membranscheiben als Federn dienten [2.8].

*Drehstabfedern* sind Konstruktionen neueren Datums. Sie erforderten doch einen entsprechenden Aufwand zur sicheren Konstruktion der Einspannstellen, so dass sie erst im letzten Jahrhundert Anwendung als Fahrzeugfedern und Federn für Kraftmesseinrichtungen fanden.

### 2.3.4 Zug- und druckbeanspruchte Federn [2.13]

Über die Verwendung von Zugstäben als Federn gibt es die ersten Hinweise bei *R. Hooke* [2.3]. 1908 wird von einer Tragfeder berichtet, die aus Zug- und Druckstäben zusammengesetzt ist und von *C. Leist* (Berlin) zum Patent angemeldet wurde [P12]. Der bereits als Kurzbezeichnung für Schraubendruck- und Schraubenzugfedern vergebene (eingebürgerte) Begriff „Druckfeder“ und „Zugfeder“ sollte hier nicht verwendet werden, um Missverständnisse zu vermeiden. Besser ist die Bezeichnung Zugstab- und Druckstabfeder.

In diese Kategorie Federn gehört auch die von *Ernst Kreissig* 1920 erfundene *Ringfeder*<sup>®</sup>, die aus wechselsinnig geschichteten Ringen mit konischen Innen- und Außenflächen besteht. Bei Einleitung von Druckkräften in Richtung der Ringmittellinie entstehen in den Querschnitten der Ringe Druck- bzw. Zugspannungen. Sie findet heute umfangreiche Verwendung als Ringfedersäule und als Spannelement [2.12][2.10].

## **3 Entwicklung der Federwerkstoffe und Halbzeugherstellung**

### **3.1 Federwerkstoffe und die Entwicklung ihrer Herstellungstechniken**

#### **3.1.1 Überblick**

Die Entwicklung der Federn ist untrennbar mit der Entwicklung ihrer Werkstoffe verbunden. **Tafel 2.2** enthält dazu einen Überblick mit Hinweisen auf die verwendeten Werkstoffe.

Entwicklungsgeschichtlich wurden zuerst Naturprodukte in Form von Holz und Fasern (Haare, Wolle, Hanf ... ) zum Bau von Federn verwendet. Später sind Metalle (Bronze und Eisen) für solche Bauteile genutzt worden, die im weitesten Sinne als Federn zu bezeichnen sind. Heute sind *Stäbe*, *Drähte* und *Bänder* aus Metallen oder Kunststoffen die vorwiegend für die Herstellung von Federn eingesetzten Halbzeuge.

Über die Herstellung metallischer Drähte und Bänder, die neben anderen Verwendungen auch für Federn genutzt wurden, gibt es in der Literatur verstreut verschiedene Berichte [3.20][3.34][3.75][3.69][3.54][3.14][3.30][3.46]. Gießen und Schmieden gelten dabei als die Verarbeitungstechniken, deren Wurzeln bereits im Altertum lagen und die mit der Entwicklung der Metalltechnik eine immer größere Vervollkommnung erfuhren. Sowohl das "Flachschiemen" von Bändern als auch das "Rundschmieden" von Stäben und Drähten sind grundlegende Verfahren, die bis in die Neuzeit genutzt wurden, um Halbzeugformen für Federkonstruktionen herzustellen.

Berichte über die Anfänge des Einsatzes von Walzwerken für die Federbandherstellung als auch über Federdrahtziehtechniken sind kaum vorhanden. Nur aus der Analyse von Draht- und Bandfunden bzw. Funden von Erzeugnissen, bei denen Drähte und Bänder mit verarbeitet wurden, lassen sich Rückschlüsse auf deren Herstellung ziehen.

#### **3.1.2 Zur Entwicklung von Federstahl**

##### **3.1.2.1 Allgemeines**

Bis ins 17. Jahrhundert verarbeitete man nur "reines" Eisen zu Draht. Nach [3.43] ist das Stahldrahtziehen während des 30-jährigen Krieges von *Johann*

*Gerdes*, der aus Schweden eingewandert war, in Altena eingeführt worden. Die Herstellung von Federstahlbändern erfolgte auf der Basis der Blechherstellung, wobei die Verbreitung von Stahl für Federn Anfang des 18. Jahrhunderts von Sheffield aus erfolgte.

Vor allem Uhrmacher forderten immer besseres Ausgangsmaterial für die Eigenproduktion der Federn für Uhren. Die allgemeine Praxis in der damaligen (Beginn des 18. Jahrhunderts) Stahlherstellung bestand in der Anwendung des sogenannten Blasenverfahrens, mit welchem Puddel-Eisenbarren zu Stahl weiterverarbeitet wurden. Die Puddelluppen (rohe Eisenbarren) wurden in pulverisierte Holzkohle gebettet, in einem Ofen erhitzt und dadurch "aufgekohlt". Der erreichte Kohlenstoffgehalt im Eisen war von der Aufkohlungszeit abhängig. Der Name "Blasenstahl" leitet sich von den im Eisen enthaltenen Schlacken- und Zunderanteilen ab, die zu Schlackenlöchern und Zunderblasen führten [3.34].

Dieses so erhaltene Rohmaterial wurde, als Flachprofil und auch als Draht gezogen, zur Herstellung verschiedener Federarten genutzt. Eine Qualitätsverbesserung dieses Materials erreichte man durch die Weiterverarbeitung zum sogenannten "Scherenstahl" und "doppelten Scherenstahl" in Sheffield. Spezielle Verfahren dazu wurden von *Benjamin Huntsman* (1704 - 1776) entwickelt [3.34]. Von ihm stammen das Schmelztiegel- bzw. Gussstahlverfahren zur Erzeugung erstklassiger Federstähle, das bis ins 19. Jahrhundert hinein (etwa 100 Jahre nach seinem Tod) angewendet wurde.

### 3.1.2.2 Patentierte Drähte

Das nach dem englischen Ingenieur *Sir Henry Bessemer* (1813 - 1898) benannte Bessemer-Verfahren (Erfindung 1855) zur Herstellung reinen Flussstahls (Bessemerstahl) ermöglichte eine weitere Verbesserung der Qualität von Federstahl gegenüber dem bis dahin angewendeten Puddelverfahren. Mit dem Bessemer-Verfahren konnte auch die Stahlproduktion erhöht und verbilligt werden.

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts begann die Walzdrahtherstellung, wobei der Draht aus Metallbarren in runder Form gewalzt wurde und die Weiterverarbeitung des Drahtes dann auf Grob- und Feinziehmaschinen erfolgte. Dadurch konnte der erhöhte Bedarf von Federstahldraht zur Fertigung der verschiedensten Federn und Federelemente gedeckt werden. Hochfeste und federharte Drähte ließen sich erst um 1870 durch die Anwendung eines speziellen, jahrelang geheimgehaltenen Verfahrens herstellen [3.38][3.39]. Das im üblichen Ziehprozess eingelagerte Zwischenglühen (Rekristallisationsglühen) wurde durch eine besondere Wärmebehandlung ersetzt, die zu



einem sorbitischen Gefüge im Drahtmaterial führt. Diese als "Patentieren" bezeichnete isotherme Wärmebehandlung (Perlitglühen) ist ein Verfahren, bei dem Draht oder Band im Durchlauf- oder Tauchverfahren erwärmt und anschließend in einem Abschreckmedium (z. B. Blei → Bleipatentieren) bei Temperaturen um 550°C abgeschreckt wird. Man erreicht dadurch höhere Zugfestigkeiten als beim üblichen Rekristallisationsglühen und beim nachfolgenden Ziehen bzw. Walzen eine große Kaltverfestigung (Umformgrad bis 85%) [3.75]. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war die Entwicklung verfahrensseitig und werkstoffseitig so vollendet, dass ein optimaler Federdraht vorlag. Allerdings wurden noch vielseitige Untersuchungen durchgeführt, um den Werkstoff an die Forderungen der Federhersteller anzupassen [3.5] [3.68] und geeignete mechanisch-technologische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Ziehtechnologie zu ermitteln und letztlich allgemeingültig festzulegen. Das Ergebnis fand in den 1960er Jahren als Federstahldraht in den Sorte A bis D in der DIN 17223 Bl.1 als Ersatz für die damalige DIN 2076 seinen Niederschlag.

Nach Abschluss der europäischen Normung stellt patentiert gezogener Federstahldraht nach DIN EN 10270-1 heute eines der größten Materialpotentiale für Federn dar.

### 3.1.2.3 Vergütete Drähte

In Deutschland wurden bis zu den Jahren 1928/30 vorwiegend patentiert gezogene Drähte für dynamisch hoch und höchst belastete Druckfedern verarbeitet, während aus den USA ölschlussvergütete Drähte bekannt waren. Ölschlussvergütete Drähte wurden erstmals in Deutschland um 1935 eingesetzt, jedoch gab es dazu erhebliche Meinungsverschiedenheiten in der Federnindustrie. So wurden vergütete Ventildfedern aus niedrig legierten Federstählen für Viertaktmotoren bevorzugt.

Die Dauerfestigkeit von Schraubenfedern, insbesondere von Ventildfedern für Viertaktmotoren, stand seit den dreißiger Jahren im Mittelpunkt vielseitiger Untersuchungen.

Eine Gemeinschaftsuntersuchung der Arbeitsgruppe Ventildfedern der Lienthal-Gesellschaft ergab nach *P. Kötzschke* [3.42], dass bei sorgfältiger Erschmelzung und Herstellung Ventildfedern aus unlegierten Stählen möglich sind.

*Anton Pomp* und *Max Hempel* [3.59] vom Max-Planck-Institut für Eisenforschung führten eine Vielzahl von Untersuchungen zur Dauerfestigkeit von Schraubenfedern durch. So untersuchten sie, in welchem Maße die Einflüsse der Federfertigung - schlussvergüteter Draht oder schlussvergüte-

te Feder, nichtverfestigte oder kugelgestrahlte Feder - auf die Dauerfestigkeit von Ventildedern einwirken. Untersucht wurden sowohl unlegierte, als auch CrV- und SiCr- legierte Stähle. Interessante Ergebnisse dieser Arbeit sind folgende:

- die Schlussvergütung von Ventildedern beeinflusst sowohl bei unverfestigten als auch bei kugelgestrahlten Federn die Zeit- und Dauerfestigkeit gegenüber Federn aus ölschlussvergütetem Draht günstig, wobei dieses Verhalten mit höheren Zugfestigkeitswerten begründet wurde;
- bei gleicher Zugfestigkeit von ölschlussvergüteten Drähten oder schlussvergüteten Federn und Anwendung des Kugelstrahlens versprach das Schlussvergüten von Federn keine besonderen Vorteile;
- beim Vorsetzen von Druckfedern ist eine Setzgrenze anzustreben, die unter ruhender Last die Verdrehfestigkeit des Werkstoffes nahezu erreicht;
- bei Zugrundelegung gleicher Zugfestigkeit ergeben sich keine Dauerfestigkeitsunterschiede zwischen den unlegierten und legierten Stählen;

Viele Ingenieure sind an der Erhöhung der Dauerfestigkeit von Ventildedern aus ölschluss-vergüteten Drähten beteiligt, so u. a. *F. Stumpp* [3.71], *A. Kreutzer* [3.44].

Die Weiterentwicklung und Vervollkommnung von ölschlussvergüteten Ventildederdrähten zog sich fast die ganze zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts hin. Da wurden neue Stahlsorten untersucht, die Erschmelzung hinsichtlich Erhöhung des Reinheitsgrades und der Verringerung von Einschlüssen optimiert, das Schälen des Walzdrahtes eingeführt und dergleichen mehr. Heute kann man die Entwicklung dieses Werkstoffes als nahezu abgeschlossen betrachten.

Man hat immer wieder versucht, die Vorteile des blanken, patentiert gezogenen Federdrahts mit der Warmfestigkeit der niedrig legierten ölschlussvergüteten Drähte zu verbinden, indem legierte Stähle patentiert und federhart gezogen wurden (siehe hierzu auch DE 4440 729 C2 [3.12] ). Die Einführung patentiert gezogener Drähte aus einem SiCr-Federstahl erfolgte jedoch erst in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts.

In den 1970er Jahren hat man auch in Deutschland, ausgehend von russischen und amerikanischen Arbeiten, versucht [3.79][3.33], die „Thermomechanische“ (TMB) und die „Hochthermomechanische Behandlung“ (HTMB) auch bei Federstählen und bei Federn in Verbindung mit Beimen-

gungen an Mikrolegierungselementen anzuwenden, um die Festigkeits-, Zähigkeits- und letztlich auch Dauerfestigkeitseigenschaften zu verbessern.

#### 3.1.2.4 Federbänder

Für die Herstellung kaltgeformter Flachformfedern waren zunächst weichgeglühte Bänder aus Kohlenstoffstählen und niedrig legierten Si-, SiMn- und CrV-Stählen üblich. Die Federn wurden nach der Kaltumformung gehärtet und angelassen. Die verwendeten Stahlsorten entsprechen den in **Tafel 3.1** aufgeführten Beispielen.

Im Durchlaufverfahren gehärteter und angelassener Bandstahl wurde zunächst für Triebfedern (Spiralfedern) angewendet. Natürlich konnte man diesen Werkstoff auch für einfache Federformen verwenden. Kompliziert geformte Blattfedern mussten jedoch weiterhin aus geglühtem Bandstahl gefertigt und anschließend stückvergütet werden.

Das zuerst von Sandvik unter der Bezeichnung Hardflex<sup>®</sup> produzierte zwischenstufenvergütete Band zeichnet sich gegenüber dem gehärteten und angelassenen Bandstahl durch wesentlich bessere Kaltumformbarkeit aus. Obwohl sich Hardflex<sup>®</sup> nicht durchsetzte, hatten viele Jahre später *J. Brockhaus* und Mitarbeiter mit den ebenfalls zwischenstufenvergüteten PT-Bändern Erfolg [3.6] (Warenbezeichnung Bainitex<sup>®</sup> usw.).

Während patentiert gezogene Drähte schon länger existieren, stellen isothermisch geglühte (patentiert) und anschließend mit hohem Umformgrad gewalzte Bänder eine sehr junge Entwicklung dar. Als Alternative zu nichtrostenden, austenitischen oder auch zu gehärteten und angelassenen Federbändern wurden diese Federbänder mit hoher Zugfestigkeit und Walztextur speziell für Spiralfedern von den Firmen Brockhaus und Kern-Liebers entwickelt (Warennamen Sorbitex<sup>®</sup> der Firma Brockhaus) [3.41].

### 3.1.3 Entwicklung von Stählen für warmgeformte Federn

Als Federwerkstoffe wurden neben dem aus frühgeschichtlicher Zeit bekannten Holz später Metalle und Metalllegierungen sowie Gase, Flüssigkeiten, Elastomere und Faserverbundwerkstoffe eingesetzt. Von diesen hat sich insbesondere Stahl als klassischer Federwerkstoff ein breites Anwendungsgebiet im Fahrzeugbau erobert und wird in unterschiedlichsten Federarten verwendet.

Im Vorwort zum Buch „Die Federn“ [3.29] weist der Herausgeber auf die Notwendigkeit hin, die bis dahin im Schrifttum weit zerstreuten Untersu-

**Tafel 3.1.** Chemische Zusammensetzung, Festigkeitswerte und Anwendungsgebiete der gebräuchlichsten Federstähle (nach *S. Ammareller* [3.1])

Nr.	Stahlart	Stahlbezeichnung <sup>1)</sup>	Chemische Zusammensetzung (etwa)					Ge-walzt Zugfestigkeit <sup>2)</sup> kg/mm <sup>2</sup> (etwa)	Gehärtet und angelassen		Härtemittel	Beanspruchung	Federeart	Anwendung
			C %	Si %	Mn %	Cr %	V %		Streckgrenze <sup>5)</sup> kg/mm <sup>2</sup> (mind.)	Zugfestigkeit <sup>3)</sup> kg/mm <sup>2</sup>				
1	Unlegierte Stähle		0,50	0,25	0,60	-	-	65	110 bis 130	6	Wasser		Blattfedern Blatt- und Kegelfedern Schraubenfedern	
2			0,70	0,25	0,60	-	-	75	110 bis 130	6	Öl			
3	Bessemerstähle		1,00	0,25	0,55	-	-	105	110 bis 130	6	Öl		Blatt- und Kegelfedern Blatt- und Schraubenfed.	
4			0,45	0,50	0,70	-	-	75	110 bis 130	6	Wasser			
5	Mangan-Siliziumstähle		0,65	0,50	0,70	-	-	85	110 bis 130	6	Öl		Blatt- und Kegelfedern Schraubenfed.	
6			0,46	0,90	0,90	-	-	80	120 bis 140	6	Wasser			
7	Mangan-Siliziumstähle		0,65	0,90	0,90	-	-	95	120 bis 140	6	Öl		Blatt- und Kegelfedern Schraubenfed. Ringfedern	
8			0,65	1,10	1,00	-	-	100	140 bis 150	6	Öl			
9	Manganstähle		0,40	0,30	1,70	-	-	75	120 bis 140	7	Wasser	mittel	Blattfedern	
10			0,50	0,30	1,70	-	-	80	120 bis 140	7	Öl			
11	Siliziumstähle		0,38	1,50	0,60	-	-	80	120 bis 140	6	Wasser	mittel	Federlinge u. Tellerfedern	Federplatten für Schraubensicherungen, Federn für Kultivatoren Blattfedern für Schienenfahrz. f. Schienenfahrzeuge, bes. für das Härten auf Härtemaschinen geeignet
12			0,46	1,60	0,60	-	-	85	130 bis 150	6	Wasser	mittel	Kegelfedern Blattfedern	
13			0,51	1,60	0,60	-	-	90	130 bis 150	6	Wasser	mittel	Kegelfedern Blattfedern	

Tafel 3.1. (Fortsetzung)

Nr.	Stahlart	Stahlbezeichnung <sup>1)</sup>	Chemische Zusammensetzung (etwa)					Geeignete Zugfestigkeit <sup>2)</sup> kg/mm <sup>2</sup> (etwa)	Gehärtet und angelassen			Härtemittel	Beanspruchung	Federeart	Anwendung
			C %	Si %	Mn %	Cr %	V %		Streckgrenze <sup>3)</sup> kg/mm <sup>2</sup> (mind.)	Zugfestigkeit <sup>3)</sup> kg/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung <sup>3)</sup> ( $L_0 = 5d$ ) % (mind.)				
14	Siliziumstähle	55Si7 <sup>3)</sup>	0,55	1,60	0,70	-	-	95	110	130 bis 150	6	Öl	mittel	Blatt- und Schraubenfedern	bis 7 mm Dicke, auch für Federplatten u. Tellerfedern
15		65Si7 <sup>3)</sup>	0,65	1,60	0,70	-	-	105	110	130 bis 150	6	Öl	mittel	Schraubenfedern	über 7 mm Dicke a. für Tellerfedern
16		70Si7 <sup>3)</sup>	0,70	1,60	0,70	-	-	>105	120	140 bis 160	6	Öl	hoch	Blatt-, Dreh-, Drehstab- <sup>4)</sup> u. Schraubenfedern	Drehstabfedern ≤ 25 mm Ø
16a		71Si7 <sup>3)</sup>	0,70	1,60	0,70	-	-	>105	135	190 bis 230	3	Öl	hoch	Triebwerksfedern	
17	Stahl mit 3% Si		0,60	3,00	0,70	-	-	>110	140	155 bis 170	5	Öl	mittel	Schrauben- u. Schneckenfedern	
18	Chrom-Siliziumstahl		0,55	1,00	0,60	0,90	-	105	120	135 bis 155	6	Öl	hoch	Blatt-, Schrauben- u. Drehstabfedern <sup>4)</sup>	
19		67SiCr5 <sup>3)</sup>	0,65	1,30	0,50	0,50	-	>105	135	150 bis 170	5	Öl	hoch	Schnecken-, Ventil-, Schrauben- u. Ringfedern	besonders auf Schlagbeanspruchte Schraubenfedern, Drehstabfedern
20	Chrom-Vanadin-stahl	50CrV4 <sup>3)</sup>	0,50	0,20	0,80	1,00	0,10	>110	120	135 bis 170	6	Öl	hoch	Blatt-, Schrauben- u. Drehstabfedern <sup>4)</sup>	≤ 40 mm Ø Federringe, Tellerfedern, Drehstabfedern, Drehstabfedern <sup>4)</sup> ≥ 150 kg/mm <sup>2</sup> Zugfestigkeit
21		58CrV4 <sup>3)</sup>	0,58	0,20	1,00	1,10	0,10	>110	135	150 bis 170	6	Öl	hoch	Blatt-, Schrauben- u. Drehstabfedern <sup>4)</sup>	Drehstabfedern ≥ 40 mm Ø und ≥ 150 kg/mm <sup>2</sup> Zugfestigkeit

<sup>1)</sup> Die Stähle mit eingetragener Bezeichnung sind Federstähle in der für die Stahlschmelzung maßgebenden Stahl-Eisen-Liste enthalten; <sup>2)</sup> Qualitätsstahl; <sup>3)</sup> Edelstahl; <sup>4)</sup> Für Drehstabfedern werden bevorzugt ölgehärtete Stähle verwendet, um weitgehend gegen das Auftreten von Härterissen gesichert zu sein.  
Anmerkung: <sup>5)</sup> Festigkeitswerte heute: 1 kg/mm<sup>2</sup> = 9,81 N/mm<sup>2</sup>

chungsergebnisse zu Federn nach einheitlichen Gesichtspunkten durchzuarbeiten. Im Jahre 1929 wurde der Fachausschuss für Federn gegründet (s. a. Abschn. 5.5). In zwei Unterausschüssen, dem Fertigungsausschuss (Werkstoffausschuss) beim Verein deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) und dem Bauartauschuss beim Verein deutscher Ingenieure (VDI), wurden die Werkstoff- und Verarbeitungsfragen bzw. die Einzelheiten der Berechnung in den darauf folgenden 10 Jahren bearbeitet.

Schon Ende 1931 erstatteten *Houdremont* und *Bennek* [3.37] im Unterausschuss für Werkstoffe des Fachausschusses Federn einen Bericht über Zusammensetzung, Herstellung und Verhalten der Federstähle beim Walzen und Vergüten, ihre statischen und dynamischen Eigenschaften, besonders die Schwingfestigkeit am polierten Stab und den Einfluss der Walzhaut. Hingewiesen wurde auf die Verringerung der Schwingfestigkeit von Eisenbahn- und Autofedern durch die Kerbwirkung der schwarzgewalzten Oberfläche, durch die Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit bei der Wärmebehandlung und durch Korrosion im Betrieb.

Einen hervorragenden Rückblick auf die Entwicklung der Federstähle von ihren Anfängen bis über die Mitte des 20. Jahrhunderts hinaus gibt *Sepp Ammareller*, der „Federstahlpapst“ des Bochumer Vereins, in zwei Veröffentlichungen [3.1][3.2] von 1952 bzw. 1964. Besonders die erste Arbeit enthält eine ausführliche Darstellung (s. Tafel 3.1) von den ersten unlegierten Federstählen über die Bessemer-Federstähle zu den legierten Siemens-Martin-Stählen, die zunächst als Mangan-Silizium-Federstähle anfielen und schließlich zu den weitverbreiteten Silizium-Federstählen mit 1,4 bis 2,2 % Si und 0,5 bis 1 % Mn führten. Bis zum Jahre 1925 wurde der wasserhärthbare Mangan-Silizium-Stahl mit 0,46% C, 0,9% Si und 0,9% Mn für Schienenfahrzeugfedern mit bestem Erfolg im In- und Ausland eingesetzt. Danach ging die Deutsche Reichsbahn zur weiteren Leistungssteigerung auf die ebenfalls wasserhärthbaren Siliziumstähle 46Si7 für Blattfedern bis 18 mm Blattdicke und 51Si7 für Blattfedern ebenfalls bis 18 mm Dicke und Schraubenfedern bis 25 mm Durchmesser über. In einer Liste der von Hoesch verarbeiteten Federstahlsorten aus dem Jahre 1961 [3.35] wird der Stahl 46Si7 für Handhärtung und der Stahl 51Si7 für Maschinenhärtung von Blattfedern angegeben. *Ammareller* führt als Grund für die Verwendung von Wasserhärtern die einfache Nachbearbeitung ausgebafter Federn mit billigstem Härtemittel an.

In der Zeit zwischen den Weltkriegen wurden noch weitere Federstähle entwickelt, von denen ein Federstahl mit 3% Si, die Chrom-Silizium-Stähle (z.B. 67SiCr5) sowie als hochwertige Federstähle die Chrom-Vanadium-Stähle (z.B. 50CrV4) genannt werden sollen, die als Edelmetalle besonders sorgfältig und gewissenhaft hergestellt werden müssen. Der Stahl mit dem

hohen Siliziumanteil wurde für schlagbeanspruchte Schraubenfedern in Geräteträgern eingesetzt (elegante Umschreibung von Rückschlagfedern in Geschützen). Federnwerker aus der Zeit des 2. Weltkriegs berichteten der nachfolgenden Generation von Schwierigkeiten bei der Verarbeitung, für die *Ammareller* die hohe Entkohlungs- und Schwarzbruchanfälligkeit angibt. So meiden manche Federnwerke diesen Stahl durch Einsatz des Chrom-Silizium-Stahles 67SiCr5, der auch für Drehstabfedern bis 40 mm rund angewendet wird.

Von den Chrom-Vanadium-Stählen finden zunächst der 50CrV4 bis 40 mm rund und der 58CrV4 über 40 mm rund für Sonderfahrzeug-, Schrauben- und Drehstabfedern Verwendung. Als Vorteile werden von *Ammareller* höchste Unempfindlichkeit gegen Überhitzung, stärkste Einhärtung, hoher Widerstand gegen Entkohlung, ein hohes Streckgrenzenverhältnis und gute Zähigkeit auch noch bei Vergütefestigkeit bis  $170 \text{ kg/mm}^2$  ( $\sim 1700 \text{ N/mm}^2$ ) genannt.

*Ammareller* empfiehlt in seiner jüngeren Arbeit, den 58CrV4 (bis 50 mm rund) wegen der nur geringfügig höheren Härte gegenüber 50CrV4 (bis 40 mm rund) durch den zusätzlich mit Molybdän legierten Federstahl 51CrMoV4 (bis 70 mm rund, später reduziert bis 60 mm rund) zu ersetzen. Diese Empfehlung setzte sich auch durch, so dass der Stahl 58 CrV4 in der DIN 17221 (Ausgabe 1972) nicht mehr aufgeführt wurde.

Die genannte Reduzierung der Grenzabmessung des 51CrMoV4 von 70 mm rund auf 60 mm rund hängt auch sicherlich mit der Entwicklung des Sonderfederstahls 56NiCrMoV7 für Drehstabfedern bis 80 mm Durchmesser und Vergütefestigkeiten bis  $2300 \text{ N/mm}^2$  in den 1960er Jahren zusammen.

Für die normalen Anwendungen im Automobilbau leitete zu dieser Zeit in Deutschland die Entwicklung der nicht genormten Stahlsorte 55MnCr33, die später als 55Cr3 in DIN 17221 (**Tafel 3.2**) Eingang fand und eine kostengünstigere Alternative zum 50CrV4 für den unteren Abmessungsbereich (bis 16 mm flach und 25 mm rund) ist, eine Abkehr von den Siliziumstählen bei Tragfedern ein. Hierzu hat insbesondere die Entkohlungsfreudigkeit der Siliziumstähle in Verbindung mit noch höheren Anforderungen an die Qualität der Automobilfedern in Deutschland beigetragen. Stabilisatoren werden teilweise jedoch weiter aus dem Siliziumstahl 60SiCr7 gefertigt. Für Stabilisatoren im unteren Abmessungsbereich wurden auch einige Jahre lang die nicht genormten Kohlenstoffstähle Ck53+Cr bis 14 mm bzw. Ck67+Cr bis 21 mm verwendet [3.36].

**Tafel 3.2.** Sorteneinteilung und chemische Zusammensetzung der Federstähle nach DIN 17221 (Dezember 1972)

Stahlorte	Vergleichbarer Stahl (Bezeichnung) nach Euronorm 89/71	Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) in Gew.-%									
		Werkstoffnummer	ISO-Entwurf <sup>1)</sup>	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	
Qualitätsstähle											
38 Si7	—	—	0,35 bis 0,42	1,5 bis 1,8	0,50 bis 0,80	0,045	0,045	—	—	—	
51 Si7	50 Si 7	2	0,47 bis 0,55	1,5 bis 1,8	0,50 bis 0,80	0,045	0,045	—	—	—	
60 SiCr7 <sup>3)</sup>	—	6	0,55 bis 0,65	1,5 bis 1,8	0,70 bis 1,00	0,045	0,045	0,20 bis 0,40	—	—	
Edelstähle											
55 Cr-3	55 Cr-3	7	0,52 bis 0,59	0,15 bis 0,40	0,70 bis 1,00	0,035	0,035	0,60 bis 0,90	—	—	
50 CrV 4	50 CrV 4	9	0,47 bis 0,55	0,15 bis 0,40	0,70 bis 1,10	0,035	0,035	0,90 bis 1,20	0,10 bis 0,20	—	
51 CrMoV 4 <sup>4)</sup>	51 CrMoV 4	10	0,48 bis 0,56	0,15 bis 0,40	0,70 bis 1,10	0,035	0,035	0,90 bis 1,20	0,07 bis 0,12	—	

<sup>1)</sup> In dieser Tabelle nicht aufgeführte Elemente dürfen dem Stahl außer zum Fertigbehandeln der Schmelze ohne Zustimmung des Bestellers nicht absichtlich zugesetzt werden.  
<sup>2)</sup> Es sind alle angemessenen Vorkehrungen zu treffen, um die Zufuhr solcher Elemente aus dem Schrott und anderen bei der Herstellung verwendeten Stoffen zu vermeiden, die die Härbarkeit, die mechanischen Eigenschaften und die Verwendbarkeit beeinträchtigen.  
<sup>3)</sup> Zur Zeit Entwurf ISO/DIS 6831XV von 1972, siehe Erläuterungen.  
<sup>4)</sup> Bei der Herstellung dieser Sorten sind Nickel, Cobalt, Eisenbahnverbindendes (UIC) und Molybdän in der Schmelzanalyse enthalten.  
<sup>5)</sup> Der Stahl muß außerdem 0,15 bis 0,25 Gew.-% Mo in der Schmelzanalyse enthalten.



Erst ab etwa 1990 kehrte man bei Schraubenfedern als Tragfedern in Automobilen aufgrund erheblich verbesserter Produktionsmethoden zur Unterdrückung der Entkohlung durch moderne Erwärmungsöfen oder den Übergang auf die induktive Schnellerwärmung zu den heute eingesetzten Silizium-Chrom-Federstählen, insbesondere dem 55SiCr6, zurück [3.21]. Mit dieser Federstahlsorte kann man trotz einer auf bis zu etwa 2000 N/mm<sup>2</sup> angehobenen Vergütefestigkeit (im Jahre 2000 erzielt) die Gütewerte des Setzverhaltens und der Lebensdauer der Federn über ein ganzes Fahrzeugleben beibehalten. Vorteile dieses Stahls sind die hohe Elastizitäts- und Streckgrenze, das hohe Streckgrenzenverhältnis, die ausreichende Zähigkeit, die bessere Anlass- und Zunderbeständigkeit und die geringere Setzneigung.

Für die Parabelfedern, die sich gegenüber den geschichteten Trapezfedern durchgesetzt haben, eignet sich bei Vergütefestigkeiten bis 1800 N/mm<sup>2</sup> weiterhin der Klassiker 50CrV4. Jedoch wird seit 2000 eine Niob-legierte Variante für leistungsgesteigerte Parabelfedern diskutiert, die sich in einigen Forschungsprojekten [3.58][3.3] als vorteilhaft erwiesen hat.

Mit dem Ausbau der europäischen Normung ist für Federstähle die Euro-norm EN 10089 entstanden, in der auch die deutschen Belange berücksichtigt wurden. **Tafel 3.3** zeigt einige Daten aus dieser Norm.

### 3.1.4 Entwicklung anderer Federwerkstoffe

Neben Werkstoffen wie Kupfer und Kupferlegierungen sowie Holz, die neben Eisen bereits seit dem Altertum für Federn verwendet wurden, werden Kautschuk, Kunststoffe sowie Flüssigkeiten und Gase erst in der Neuzeit für derartige Bauelemente eingesetzt. Eine breite Entwicklung haben im 20. Jahrhundert Eisen- und Kupferlegierungen erfahren [3.16]. Die Entwicklung ist sehr vielgestaltig, so dass für bestimmte Einsatzzwecke der Federn immer mehrere geeignete Werkstoffe zur Verfügung stehen. Eine Auswahl unter Vermerk des Haupteinsatzgebietes ist in **Tafel 3.4** zusammengestellt.

Von den Nichtmetallwerkstoffen hat Gummi eine herausragende Bedeutung erlangt. Besondere elastische Eigenschaften, gutes Dämpfungsvermögen, die Absorption von Schall aber auch eine fast völlige Inkompressibilität zeichnen diesen Werkstoff aus, wobei diese Eigenschaften durch die Zusammensetzung des Gummis in weiten Grenzen veränderbar sind (außer der Inkompressibilität) [3.28][3.27].

**Tafel 3.3. Stahlsorten und festgelegte chemische Zusammensetzung nach DIN EN 10089 (4/2003)**

Kurznamen	Stahlbezeichnung	Massenanteil in % <sup>a, b</sup>											V	Cu + Sn			
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu+10Sn+0,60							
35S17	1.5023	0,35 bis 0,42	1,50 bis 1,80	0,50 bis 0,80	0,025	max.											
46S17	1.5024	0,42 bis 0,50	1,50 bis 2,00	0,50 bis 0,80	0,025	0,025											
56S17	1.5026	0,52 bis 0,60	1,60 bis 2,00	0,60 bis 0,90	0,025	0,025											
55Cr3	1.7177	0,52 bis 0,59	max. 0,40	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00										
60Cr3	1.7177	0,55 bis 0,65	max. 0,40	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00										
54SiCr6	1.7102	0,51 bis 0,59	1,20 bis 1,60	0,50 bis 0,80	0,025	0,025	0,50 bis 0,80										
56SiCr7	1.7106	0,52 bis 0,60	1,60 bis 2,00	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00										
61SiCr7	1.7108	0,57 bis 0,65	1,60 bis 2,00	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00										
45SiCr4	1.8169	0,47 bis 0,55	max. 0,40	0,70 bis 1,10	0,025	0,025	0,90 bis 1,20								0,10 bis 0,25		
45SiCr4	1.8151	0,40 bis 0,50	1,30 bis 1,70	0,60 bis 0,90	0,025	0,025	0,40 bis 0,80								0,10 bis 0,20		
54SiCr6	1.8152	0,51 bis 0,59	1,20 bis 1,60	0,50 bis 0,80	0,025	0,025	0,50 bis 0,80								0,10 bis 0,20		
61SiCr7	1.8153	0,56 bis 0,64	1,50 bis 2,00	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00								0,10 bis 0,20		
46SiCr4	1.8062	0,42 bis 0,50	1,30 bis 1,70	0,50 bis 0,80	0,025	0,025	0,50 bis 0,80								0,20 bis 0,30		
59SiCrNi6	1.8063	0,46 bis 0,54	1,40 bis 1,80	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,80 bis 1,10								0,20 bis 0,35		
52SiCrNi6	1.7117	0,49 bis 0,56	1,20 bis 1,50	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00								0,50 bis 0,70		
52CrNiMo4	1.7701	0,48 bis 0,56	max. 0,40	0,70 bis 1,10	0,025	0,025	0,90 bis 1,20								0,15 bis 0,30		
60CrMo3-1	1.7239	0,56 bis 0,64	max. 0,40	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00								0,06 bis 0,15		
60CrMo3-2	1.7240	0,56 bis 0,64	max. 0,40	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00								0,15 bis 0,25		
60CrMo3-3	1.7241	0,56 bis 0,64	max. 0,40	0,70 bis 1,00	0,025	0,025	0,70 bis 1,00								0,25 bis 0,35		

<sup>a</sup> In dieser Tabelle nicht aufgeführte Elemente dürfen dem Stahl, außer zum Fertigbehandeln der Schmelze, ohne Zustimmung des Bestellers nicht absichtlich zugesetzt werden. Es sind alle Legierungselemente zu treffen, um die Zulieferer Elemente aus dem Schrott oder anderen bei der Herstellung verwendeten Stoffen zu vermeiden, die die Härtehaftigkeit, die mechanischen Eigenschaften und die Verwendbarkeit beeinträchtigen.

<sup>b</sup> Bei Stählen mit festgelegten Härtebereichsanforderungen (siehe Tabellen 7 und 8) sind, außer für Phosphor und Schwefel, geringfügige Abweichungen von den Grenzwerten der Schmelzeanalyse erlaubt. Diese Abweichungen dürfen jedoch  $\pm 0,01\%$  (Massenanteil) bei Kohlenstoff und in allen anderen Fällen die Werte nach Tabelle 1 nicht überschreiten.

**Tafel 3.4.** Beispiele für Federwerkstoffe und Einsatzgebiete [3.47]  
[3.48]

<b>Federwerkstoff - Bezeichnung</b>		<b>Verwendung als/für (Einsatzbeispiele)</b>
allgemein	Beispiele	
Kohlenstoffstahl, unlegiert	Ck55, Ck60, Ck 67, Ck 101, MK 75	Basismaterial für patentierten Federstahldraht; Federbandstahl, kaltgewalzt für Blattfedern, Spiralfedern und Triebwerksfedern aller Art, Rolfedern, Flachformfedern
Federstahl, legiert	50CrV4, 55Cr3, 67SiCr5	Blattfedern, Tellerfedern und alle Schraubenfedern; spezielle Federstahlsorten für besondere Ansprüche an Dauerhaltbarkeit, Warmfestigkeit und an das Formänderungsvermögen
Federstahl, nichtrostend	X12CrNi17.7, X7CrNiAl17.7	Federn mit besonderen Ansprüchen an die Korrosionsbeständigkeit
Kupferlegierungen	CuZn37, CuSn6, CuNi18Zn20	Federn der Elektrotechnik und des Gerätebaus bei besonderen Ansprüchen an die elektrische Leitfähigkeit und Antimagnetismus
Berylliumlegierungen	CuBe2	hochbeanspruchte Federn des elektrischen und mechanischen Gerätebaus, aushärtbare Legierungen
Sonderlegierungen	Monel	unmagnetische, aushärtbare Ni-Cu-Fe-Legierung mit guter Korrosionsbeständigkeit
	Inconel	unmagnetische, aushärtbare Ni-Cr-Fe-Legierung, Anwendungstemperaturen von der Wärmebehandlung abhängig
	Hastelloy	Ni-Cr-Mo-Legierung mit ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit
	Nivarox	unmagnetische Fe-Ni-Cr-Ti-Legierung, aushärtbar
Kunststoffe		Federn bei besonderen Ansprüchen an die Korrosionsbeständigkeit
Gummi		Federelemente zur Maschinen- und Geräteabstützung und hohen Ansprüchen an Schwingungsisolierung, Schwingungs-, Geräusch- und Stoßdämpfung
Glas und Keramiken	Quarzglas	Federelemente mit extremen Forderungen an die Konstanz besonderer physikalischer Eigenschaften, hohen Temperaturen und Korrosionsbeständigkeit
Holz		besondere Aufgaben bei Holzkonstruktionen, Spielzeuge
Flüssigkeiten	Öl	Federungsarbeiten im Fahrzeug-, Werkzeug- und Vorrichtungsbau
Gas	Luft; Stickstoff	Federungsarbeiten im Fahrzeugbau

In der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts hielten Kunststoffe wegen ihrer geringen Korrosionsanfälligkeit vor allem im Fahrzeugbau Einzug. Die Federungseigenschaften und vor allem die Tragfähigkeit konnten durch die Entwicklung von Verbundstoffen (faserverstärkte Kunststoffe ... ) wesentlich verbessert werden [3.15].

Glas- und Keramikwerkstoffe werden für spezielle Anwendungen in der Mess-, Sensor- und Wägetechnik sowie speziell bei extremen Temperaturbelastungen eingesetzt, während Federn der Siliziumoxidtechnik [3.65] vor allem in der Mikromechanik der Gegenwart zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Für verschiedene Einsatzfälle in der Fahrzeugtechnik und einigen Bereichen des allgemeinen Maschinenbaues werden in der Gegenwart auch Gase (vorwiegend Luft) zur Federung verwendet.

## **3.2 Halbzeugherstellung für Federn**

### **3.2.1 Entwicklung der Techniken zur Federdrahtherstellung**

Schriftliche und erst recht bildliche Berichte über die Herstellung von Draht im Altertum und frühen Mittelalter fehlen nahezu ganz. Literaturauswertungen von *Nenninger* [3.54] ergaben, dass weder im griechischen noch im römischen Sprachgebrauch ein "Drahthersteller" oder "Drahtzieher" als Berufsbezeichnung zu finden ist. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Handwerker die Herstellung von Draht, den sie für ihre Produkte benötigten, zunächst selbst vorgenommen haben. Das ist auch bis ins 19. Jahrhundert so gewesen. Allerdings ist auch bekannt [3.43], dass bereits um 1400 Altenaer Draht über Soest, Dortmund und die Hansestadt Lübeck nach Skandinavien und Russland sowie über Köln nach Holland und England geliefert wurde. Aus den Analysen von Drahtfunden lassen sich vier grundsätzliche Herstellungsverfahren für Drähte angeben.

Als ältestes Herstellungsverfahren ist wohl das Gießen anzusehen. Damit ließen sich jedoch nur relativ dicke Drähte (Stäbe) herstellen, die durch Hämmern (Schmieden) und Feilen weiter verarbeitet werden mussten. Ein weiteres Verfahren ist das sogenannte "Blockdrehen". Dabei wurden Metallstreifen (Bänder) um ihre Längsachse verdreht. Sie erhielten dadurch ein spiralförmiges Aussehen. Mit Hammer und Feile wurden dann Verbesserungen der Form vorgenommen. Mehrmaliges Zwischenglühen war in den meisten Fällen erforderlich. Eine weitere Methode der Drahtherstellung bildete das "Rundhämmern" von entsprechend zubereiteten Metallstreifen.

Diese Methode eignete sich ebenfalls vorwiegend für die Herstellung relativ dicker Stäbe und Drähte. Als viertes Verfahren ist die Technik des Drahtziehens zu nennen. Ein entsprechend grob vorgeformtes Metallstück (beispielsweise nach einer der vorgenannten Methoden hergestellt) wird nacheinander durch sich verjüngende Löcher einer Bronze- oder Eisenplatte gezogen, bis die gewünschte Drahtdicke erreicht ist.

Um 1100 wird von einem Mönch namens *Theophilus* über das Ziehen von Draht berichtet. Die Art und Weise der Ausführungen lässt vermuten, dass diese Fertigungsweise zur damaligen Zeit seit langem bekannt war. Diese Annahme wird durch neuere Untersuchungsergebnisse gestützt, die in der Schweiz an Drahtfunden aus der Römerzeit gewonnen wurden und das Herstellen des Drahtes durch Ziehen eindeutig nachweisen [3.54][3.39].

An Drahtfunden wurden parallel zur Längsachse verlaufende Schleifspuren gefunden, die vermuten lassen, dass Drahtziehtechniken schon im Altertum angewendet wurden. Vornehmlich bei der Herstellung von Golddrähten und -fäden wurde von einem dünnen, flachen Metallstreifen ausgegangen, der nach dem Durchziehen durch die ersten Löcher die Form einer Röhre erhielt. Im weiteren Ziehablauf überlappten sich die Ränder zunehmend, bis ein fester Metalldraht entstanden war. Dieser Vorgang erforderte verhältnismäßig geringe Ziehkräfte. Entsprechende Funde deuten darauf hin, dass dieses Verfahren sowohl in den ägyptischen als auch griechischen und römischen Kulturen genutzt wurde, um sehr dünne Drähte (vor allem Goldfäden für Gewänder und Schmuck) herzustellen [3.54]. Die Herstellung der für Gewänder und Schmuck verwendeten dünnen Fäden kann man sich auf andere Weise nicht vorstellen. Das Verfahren ist als Vorstufe des eigentlichen Drahtziehprozesses zu werten, wie er später für die Herstellung von Eisendrähten verwendet wurde, bei dem plastische Umformungen des jeweiligen Drahtquerschnittes erfolgen.

Zur Herstellung von Eisendrähten, die etwa auf das erste bis vierte Jahrhundert unserer Zeitrechnung zurückgeht [3.75], wurden aus "reinem" Eisen (mit den damals möglichen Kenntnissen über die Zusammensetzung der Schmelze) in Rennfeuern gewonnene Rohluppen zunächst durch Schmieden auf den nachfolgenden Ziehprozess vorbereitet. Den auf diese Weise gewonnenen rohen Schmiededraht zog man dann durch ein in einen Baumstumpf eingeschlagenes Zieheisen. Der sich bildende Zunder wurde abgeschabt. In entlegenen Gegenden Schwedens und Rußlands ist diese Technologie bis ins 18. Jahrhundert erhalten geblieben.

Aus der Rohluppe wurde zunächst als Ausgangsmaterial ein „Knüppel“ geschmiedet, der etwa 1 m lang war und den quadratischen Querschnitt von ca. 50x50 mm aufwies. Aus diesem Knüppel wurde der Schmiededraht dann rund auf einen Durchmesser von 10 – 12 mm geschmiedet. Die Länge

der einzelnen Stangen betrug etwa 3 m. Anschließend erfolgte der Grobzug dieser Stangen zu einem Draht von 7,6 bis 3,0 mm, dann der Mittelzug auf einen Durchmesser von 3,4 bis 0,8 mm und schließlich der Feinzug auf 0,7 bis 0,2 mm. Zum Ziehen wurden die Schmiedestangen einseitig zugespitzt und in ein Hol (Bohrung) des Zieheisens gesteckt, um anschließend zur Verjüngung durchgezogen zu werden.

Bis in das 19. Jahrhundert war Schmiededraht alleiniges Ausgangsmaterial für das Drahtziehen. Walzdraht als Ausgangsmaterial hat sich erst um die Mitte des 19. Jahrhunderts vollständig durchgesetzt.

Anfangs stand der Drahtzieher auf dem Zieheisen und zog durch Strecken des Körpers den Draht (Trampelzug). Erleichterung brachte dann der Schockenzug, bei dem der Drahtzieher auf einer Schaukel saß und das Zieheisen vor ihm (z.B. in einem Baumstumpf) eingeschlagen war. Etwa im 12. bis 13. Jahrhundert wurden Spulen zur Erleichterung des Ziehens dünner Drähte eingesetzt. Zwischen zwei Spulen ordnete man das Zieheisen an, wobei eine dieser beiden Spulen durch eine Handkurbel gedreht werden konnte (Leirenzug). Ab dem 14. Jahrhundert verwendete man die Wasserkraft zum Antrieb dieser Spulen und konnte somit auch die dickeren Drähte ziehen. Dieser Grundaufbau kann wiederum als Basis für die heutige Drahtzieh-technik angesehen werden, für die Mehrfachdrahtziehmaschinen kennzeichnend sind, deren Entwicklung auf eine 1895 von der Fa. Berkenhoff & Debes in Asslar/Hessen (als "Herborn-Maschine" bekannt) entwickelte Maschine zurückgeht (s. a. Drahtmuseum in Altena, [3.43] und [3.81]).

### 3.2.2 Entwicklung der Techniken zur Federbandherstellung

Bandförmiges Material für Federn wurde sicher, wie auch bei der Herstellung der Drähte, zunächst durch Gießen und Weiterverarbeiten mittels Hammer von alters her handwerklich gefertigt. Durch das Hämmern erhielt das Material, wie bereits ausgeführt, gleichzeitig die gewisse "Federhärte". Walzeinrichtungen sind vermutlich in erster Linie im Münzwesen verwendet worden und erst später auch zur Herstellung von Federband. Hinweise dazu sind aus dem 12. Jahrhundert bekannt [3.34][3.75]. Auch von *Leonardo da Vinci* ist der Entwurf eines Walzwerkes überliefert [3.80].

Der vor allem von Uhrmachern benötigte Federbandstahl wurde von diesen selbst durch Warmwalzen hergestellt. Das Kaltwalzen von Eisenwerkstoffen fand erst im Laufe des 19. Jahrhunderts allgemeine Verwendung. Die Querschnittsabnahme des Stahlbandes erzielte man durch mehrfach wiederholtes Erwärmen und Walzen des Materials. Das Verfahren war aus der

Stahlblechherstellung bekannt. Bereits von 1620 an produzierte man in Böhmen auf diese Weise Stahlbleche. Hundert Jahre später war dieses Verfahren auch in Großbritannien zur Produktion von Weißblechen angewendet worden [3.34].

Sheffield war im 18. Jahrhundert nicht nur ein führendes Zentrum der Stahlherstellung, sondern auch für seine Stahlwaren (vor allem Schneidwerkzeuge) bekannt. Anfang des 18. Jahrhunderts fertigte man nachweislich in Sheffield auch Blasen- und Scherenstahl für Federn [3.34].

### **3.3 Wärmebehandlungsverfahren**

#### **3.3.1 Härten und Anlassen härtpbarer Stähle**

Schon seit Entwicklung der ersten Wagenfedern im 17/18. Jahrhundert in England war das Härten und Anlassen von Stahl bekannt, nur dass das Erwärmen der Feder im Schmiedefeuer erfolgte. Später geschah dies in mit festen Brennstoffen (Holz, Holzkohle, Steinkohle) befeuerten Öfen. Mit der Entwicklung von Industrieöfen im 19. Jahrhundert ging man dann zur Stückhärtung in zunächst gas- und später elektrischbeheizten Kammeröfen über. Durchlaufhärte- bzw. -anlassöfen oder vollautomatische Kammeranlagen setzten sich erst Mitte des 20. Jahrhunderts in der Federnindustrie durch, wobei durch Anwendung geeigneten Schutzgases Oberflächenbeeinträchtigungen wie Randentkohlung vermieden werden konnten.

In den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts gewann die isotherme Härtung (Zwischenstufenvergütung, Bainithärtung) große Bedeutung im Maschinenbau und gelangte auch bei Tellerfedern zur Anwendung. Es hat nach dem zweiten Weltkrieg nicht an Versuchen gefehlt, die Zwischenstufenvergütung bei Schraubenfedern anzuwenden. Jedoch das mit dem Zwischenstufengefüge verbundene niedrigere Streckgrenzenverhältnis als bei üblicherweise gehärteten und angelassenen Federn (vergüteten Federn) führte nicht zur massenweisen Einführung. Bei zu härtenden Flachformfedern, die formbedingt verzugsgefährdet sind, und bei Tellerfedern ist das Verfahren noch im Einsatz. [3.72].

### 3.3.2 Spannungsarmglühen (Anlassen) von Federn aus federharten Stahldrähten

Dass kaltgeformte Federn aus patentiert gezogenem Federstahldraht bei niedriger Temperatur angelassen werden (Begriff nach DIN 17014: Spannungsarmglühen), ist sicherlich seit 100 Jahren bekannt. Praktische Erfahrungen, wie beispielsweise das bessere Setzverhalten angelassener gegenüber unangelassener Federn, wurden von Generation zu Generation bei den Federherstellern weitergereicht.

Untersuchungen darüber, welche Änderungen bei dieser Niedrigtemperatur-Behandlung im Werkstoff stattfinden, wurden in Deutschland zuerst von *A. Pomp* in einem Bericht über einen Vortrag von *S. H. Rees*, Woolwich bekannt [3.60].

Danach beschäftigte sich auch der Ausschuss Drahtverarbeitung des VDEh mit diesem Problem. *W. Püngel* [3.61] [3.62] und später auch *Schwier* [3.67] untersuchten den Einfluss des Anlassens bzw. der Nachbehandlung (Richten und dgl.) auf die elastischen Eigenschaften von patentiertem Federdraht. So entstand damals schon der Wissensstand, den Federhersteller heute kennen: durch Anlassen werden die elastischen Dehngrenzen erhöht und durch Richten des Drahtes werden sie wieder herabgesetzt. *F. Schwier* wies besonders darauf hin, dass beim Ziehen eine ausreichende Wärmeabfuhr notwendig ist, damit die Alterung nicht schon beim Drahthersteller erfolgt.

Einen Beitrag zur Lösung der Frage, was beim Anlassen in der Feder selbst geschieht, leistete *U. Otzen* [3.56] mit der Ermittlung der sog. Wickeleigenstressungen an unangelassenen und angelassenen Druckfedern. Mit der exakten Messung der Eigenspannungen mussten die Federhersteller noch zwanzig Jahre warten.

Weniger bei technischen und mehr bei Polsterfedern interessierte die Frage, ob das unmittelbar vor dem Winden vorgenommene Anlassen des Drahtes dieselbe Wirkung hat wie das nachträgliche Anlassen der Feder. 1961/62 klärte *R. Brühl* [3.7] diese Frage und stellte den Einfluss des Drahtrichtens, des Anlassens davor bzw. danach auf die Streckgrenze des Drahtes fest.



### 3.4 Verfahren zur Nachbehandlung der Federoberflächen (Verfahren zur Erzeugung nützlicher Eigenspannungen)

#### 3.4.1 Kugelstrahlen

Während das Sandstrahlen zur Behandlung von Oberflächen seit 1870 bekannt ist, hat erst 1929 *O. Föppl* [3.26] auf den Einfluss des Oberflächen-drückens (Oberflächenverfestigung) auf die Dauerhaltbarkeit von Federn hingewiesen. Im gleichen Jahr wurde dem Stahlwerk Röchling ein Patent über das Oberflächenstrahlen von Federn erteilt [3.64]. Es hat jedoch mehrere Jahrzehnte gedauert, bis das Verfahren zur Serienreife entwickelt wurde, wobei die Entwicklung zunächst vorrangig in den USA ablief. So wurde nach [3.55] Drahtkorn erstmals in den USA angewandt.

Mitte des 20. Jahrhunderts wurde ein Entwicklungsstand erreicht und veröffentlicht, der den Federherstellern die Anwendung der Strahlbehandlung mit Stahlkugeln erlaubt [3.22][3.23][3.26][3.10][3.55][3.18][3.9]. Nach [3.55] [3.42][3.19] wurden schon in den 1930er Jahren alle Flugmotoren-Ventilfedern und ab 1938 auch Tellerfedern kugelgestrahlt.

Durch Untersuchungen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts [3.70][3.51][3.52][3.77] [3.17][3.78] wurde festgestellt, dass durch Kugelstrahlen an der vorgespannten Feder der Eigenspannungsaufbau günstig beeinflusst und die Lebensdauer weiter erhöht werden kann. Allerdings ist diese Variante nicht bei allen Federarten und Größen anwendbar.

Auch die Werkstücktemperatur hat einen Einfluss auf den Strahleffekt. So befassen sich verschiedene Untersuchungen [3.63] [3.77] mit den Wirkungen, die sich durch die Erhöhung der Werkstücktemperatur ergeben. Allerdings hat dieses Verfahren zzt. noch keine große Verbreitung gefunden.

#### 3.4.2 Vorsetzen (Plastizierung)

Seit langer Zeit ist bekannt, dass bestimmte Federn nach ihrer ersten Belastung nicht wieder in ihre Ursprungsform zurückfedern können, sondern einen Verlust an Bauhöhe erleiden. Man sagt „die Feder hat sich gesetzt“. Um dieses „Setzen“ auszugleichen, stellt man z. B. eine Druckfeder mit größerer Bauhöhe her, führt eine mehrmalige Vorbelastung durch (auch als Vorsetzen oder Plastizieren bezeichnet) und erreicht so eine für die Anwendung stabile Feder. *K. H. Walz* [3.73] untersuchte das Setzverhalten von Federn bei Schlagbeanspruchung und ermittelte, dass das Setzmaß mit stei-

gender Zugfestigkeit des Materials geringer wird. *O. Föppl* [3.24] versuchte, die Setzgrenze für Drehstäbe zu finden. *U. Otzen* [3.56] befasste sich in seiner Dissertation mit dem Setzen von Schraubenfedern und ermittelte eine Methode zur Berechnung des Setzmaßes. Er spricht schon von einem günstigen Eigenspannungszustand, der durch das Vorsetzen entsteht.

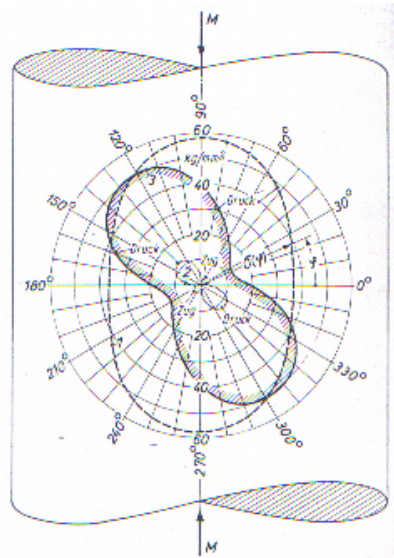
Einen wichtigen Beitrag zur Lösung der Setzproblematik leistete ebenfalls *G. Schremmer* [3.66]. Er beachtete den Bauschingereffekt und untersuchte insbesondere den Einfluss des Plastizierungsgrades beim Kaltsetzen auf die erreichbare Lebensdauersteigerung.

Die durch Kaltvorsetzen erzielbare Relaxationsbeständigkeit der Federn wird bei höheren Arbeitstemperaturen nahezu wirkungslos. Es wurden deshalb Abhilfemöglichkeiten gesucht [3.49][3.53][3.44], die zum sogenannten Warmsetzen führten. Hierbei findet das Plastizieren je nach Werkstoff- und Verwendungsart bei Temperaturen zwischen 100°C und 400°C statt.

Das Messen der Eigenspannungen war und ist eine Voraussetzung zur Optimierung der Federfertigung. Bis in die 1960er Jahre konnte die Eigenspannung nur durch mechanisch-technologische Verfahren ermittelt werden [3.56][3.57]. *Hauk* versuchte schon 1954 die Eigenspannungen aus röntgenografischen Gitterkonstanten-Messungen zu ermitteln [3.32], wobei er schon das Abätzverfahren anwandte. Ein Durchbruch wurde jedoch erst erzielt, nachdem *Macherauch* [3.45] das  $\sin^2\psi$ -Verfahren zur Auswertung der Messergebnisse einführte [3.8][3.32].

Mit Einführung der röntgenografischen Messung der Eigenspannungen [3.50] [3.25] war eine Messmethode gefunden, die heute aus der Federentwicklung nicht wegzudenken ist. Die ersten sogenannten Polardiagramme wurden von *K. H. Muhr* [3.50] veröffentlicht. **Bild 3.1** zeigt als Beispiel die Eigenspannungsverteilung an der Oberfläche eines Rundstabes.

Ein alter Traum des Federherstellers bestand darin, den Draht beim Wickeln gleichzeitig mit der Verformungsgröße zu tordieren, mit der später das Vorsetzen stattfindet. Schon 1935 wurde der Robert Bosch GmbH das Patent 676746 für ein Verfahren erteilt, mit dem der Draht vor dem Wickeln um 45° zu seiner Längsachse tordiert wurde. Erwähnenswert ist hierzu auch das DBP Nr. 2740637 (*J. Lassche* 1977). Ob beide Patente realisiert wurden, ist nicht bekannt.



**Bild 3.1:** Polardiagramm der Eigenspannungen an der Oberfläche eines geraden Stabes aus CrV- legiertem Ventildfederdraht nach K. H. Muhr [3.25]

Kurve 1: Eigenspannungen nach dem Kugelstrahlen

Kurve 2: Eigenspannungen nach dem Verdrehen eines ungestrahlten Stabes

Kurve 3: Eigenspannungen nach dem Kugelstrahlen (Kurve 1) und nach anschließendem Vorsetzen (Kurve 2)

### 3.4.3 Korrosionsschutz kaltgeformter Federn

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts war die galvanische Oberflächenbehandlung von Federn, sei es die galvanische Verzinkung oder Verkadmung, zum Zwecke des Korrosionsschutzes durchaus üblich. Da jedoch selbst bei sorgfältiger Vorbehandlung (Beizen usw.) bzw. Durchführung des Galvanisierens einschließlich Wasserstoffaustreibung Sprödbrüche durch Wasserstoffsprödigkeit nicht vermeidbar waren [3.74][3.40], gewannen auch andere Verfahren wie das stromlose Vernickeln [3.4], das Sherardisieren

ren [3.74] oder das Feuerverzinken an Bedeutung. Dabei erfordern letztere Verfahren aber Behandlungstemperaturen von 370- 400°C ( Sherardisieren) bzw. 450-500°C (Feuerverzinken) und diese sind für hochfeste Stahlfedern ungeeignet. Dagegen hat sich das Feuerverzinken bis heute beim patentiert gezogenen Federstahldraht erhalten, wenn auch die Schichtkombinationen von Zink und Aluminium (Markenzeichen Bezinal<sup>®</sup> oder Galfan<sup>®</sup>) dem nur verzinkten Draht Konkurrenz machen.

Viele Jahrzehnte wurden kaltgeformte Druckfedern, z.B. Ventildfedern, auch mit einem elastischen Kunstharzlack lackiert. Eine Übersicht über mögliche Verfahren enthält [3.76].

Einen Entwicklungssprung gab es 1981 mit der Einführung des sogenannten Delta-Magni-Verfahrens durch die Firma Dörken in Deutschland [3.11] [3.13]. Ende der 1970er Jahre entwickelte die Magni-Industries Troy (USA) ein Verfahren, das sich aus einer zink-/aluminiumhaltigen Grundbeschichtung mit kathodischer Schutzwirkung (Delta-Tone<sup>®</sup>) und organischer Versiegelung (Delta-Seal<sup>®</sup>) zusammensetzt. Die Schutzschichten können durch Tauchzentrifugierverfahren, durch elektrostatisches Spritzen, Tauchen usw. aufgebracht werden und sind heute für viele Federn im Fahrzeugbau durch andere Verfahren nicht ersetzbar.

## 4 Neuzzeitliche Entwicklungen bei Federn und in der Federntechnik

### 4.1 Federentwicklungen der Neuzeit

#### 4.1.1 Biegebeanspruchte Federn (Biegefedern)

##### 4.1.1.1 Biegefedern aus Federband

*Federband* wurde, wie bereits ausgeführt, lange Zeit von Schlossern, Schmieden und später von Uhrmachern zu den verschiedensten Federformen verarbeitet. In Schlössern findet man verschiedene Spiralfederformen als Rückstell- und Zuhaltfedern, während von Schmieden meist Wagenfedern als einfache und geschichtete Blattfedern gefertigt wurden.

Im Schwarzwald, dem Zentrum der Uhrenindustrie in Deutschland, wurden Antriebs- (auch als Zugfedern bezeichnet) und Unruhfedern in größeren Stückzahlen benötigt. 1888 wagt in Schramberg der Uhrfedermacher *Hugo Kern* den Schritt in die Selbständigkeit mit der Gründung einer Zugfedernfabrik. Es werden neben Aufzugfedern für Uhren auch Unruhfedern, Sägeblätter, diverse Platinen für die Textilindustrie und verschiedene Eisenwaren, bei denen Bandstahl verarbeitet wurde, hergestellt [4.3].

Die heutige Firma Hugo Kern und Liebers GmbH & Co., Platinen- und Federnfabrik in Schramberg ist mit einer breiten Palette der Spiralfederfertigung führend auf dem Gebiet der Verarbeitung von Federband zu Form- und Antriebsfedern aller Arten (Dichtstreifen-Wellfedern, Aufzugfedern, Migra-, Pogra- oder Negra-Rollfedern und andere Spiralfedern). Zahlreiche Neuentwicklungen (beispielsweise Superflex, Primaflex und Maximo-Triebfedern) stammen aus diesem Werk. **Bild 4.1** zeigt die charakteristische S-Form einer ungespannten Maximo-Triebfeder.

Die Berechnung von Triebfedern, die man seit dem Mittelalter für Uhrenantriebe einsetzte, wurde im 19. und 20. Jahrhundert vielfach untersucht. Eine Zusammenfassung der damaligen Berechnungsunterlagen erfolgte in der von *W. Sander* verfassten Uhrenlehre [4.84], wo u. a. über die Erzielung einer maximalen Umdrehungszahl durch die Gestaltung des Federraumes im abgelaufenen bzw. aufgezogenen Zustand berichtet wird. Weitere Berechnungsunterlagen für Triebfedern wurden 1956 veröffentlicht, die ständig weiterentwickelt wurden, so dass heute bei der Auslegung derartiger Federn auf ein solides theoretisches Fundament zurückgegriffen werden kann [4.46].

Spezielle Arbeiten stammen von *S. Gross* [4.32], *H. Keitel* [4.52], *W. Lehmann* [4.56] und *H. Paudert* [4.71] (s. a. Kapitel 5).



**Bild 4.1:** Maximo-Triebfeder, ungespannt

#### 4.1.1.2. Biegefeder aus Federdraht

Es lässt sich nicht mit Sicherheit feststellen, seit wann die zu den Schraubenfedern zählenden gewundenen Biegefeder (Schenkelfeder), heute als Drehfeder bezeichnet, bekannt sind. Auf alle Fälle kann man die Gewandnadeln (s. Bild 2.1) zu dieser Federart zählen.

Schon frühzeitig wurde jedoch in DIN 2088 die Berechnung der gewundenen Biegefeder genormt. Ihre Gestaltung war jedoch durch die sich den jeweiligen Bauteilen anpassenden Schenkeln (Federenden) recht vielseitig. Drehfedern mit zwei Federkörpern, auch als Haarnadelfeder oder Doppel-drehfeder bezeichnet, fanden schon in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts Verwendung als Ventildfedern in schnelllaufenden Verbrennungsmotoren [4.21]. Aufgrund des relativ großen Bauraumes werden heute in diesen Anwendung ausschließlich Schraubendruckfedern verwendet. Die Haarnadelfeder behielt aber ihre Bedeutung in anderen Apparaten, sei es als Pedalfeder im PKW oder Brems- und Andruckfedern beim Fahrrad.

Eine spezielle Form der Drehfeder, meist aus Profildraht gewickelt, sind sogenannte Schlingfedern für Schlingfederkupplungen (s. [P3]). Diese Feder war zunächst unverzichtbar in mechanischen Servosystemen, z.B. bei Fernschreibern, und wird heute noch in Schaltkupplungen, in Fensterhebern, bei Feststellbremsen u.ä. verwendet [4.44].

#### 4.1.1.3 Scheibenförmige Biegefedern (Tellerfedern)

Bereits 1861 wurde *Julien-Francois Belleville* ein Patent (s. Tafel 2.2) über eine besondere Feder erteilt, die die Gestalt einer kegelförmigen Ringschale hat und bei verhältnismäßig kleinem Federweg sehr große axiale Kräfte aufnehmen kann. Ihre Federkennlinie weist in Abhängigkeit bestimmter geometrischer Federgrößen [4.67] einen mehr oder weniger degressiven Verlauf auf. Einzelne Federn lassen sich gleichsinnig oder wechselsinnig geschichtet zu Federpaketen anordnen. Damit eröffnen sich dieser Feder breite Anwendungsfelder [4.101][4.96].

Die Grundlagen für ihre Berechnung wurden 1936 durch *Almen* und *Laszlo* geschaffen [4.8].

Die ersten Tellerfedern dürfte in Deutschland die Firma Friedrich Krupp hergestellt haben, die Ende der zwanziger Jahre des 20. Jahrhunderts die erste Typenliste veröffentlichte. Das Patent DP 400517 vom Jahre 1923 sollte ein Tellerfederpaket schützen. Anfang der 1930er Jahre spezialisierte sich auch die Firma Adolf Schnorr auf die Tellerfederfertigung und vertrieb diese Federn unter der Bezeichnung „Schnorrfedern“.

Die Führung von Tellerfedern war lange Zeit ein Problem. Interessant sind hierzu das Patent von *A. Schnorr* zu Tellerfedern mit Zentrierung [P22] als auch das Patent von *K. H. Muhr* über die besondere Gestaltung der Federinnenseite zur Verringerung von Reibungsverlusten [P23].

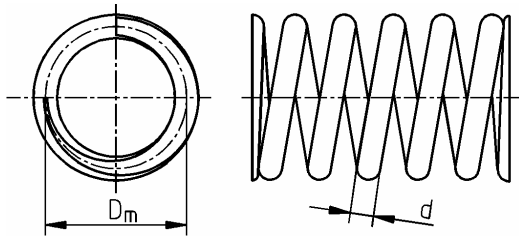
Die Fertigung und Entwicklung der *Tellerfeder* wird seit über 80 Jahren maßgeblich durch die Firmen Muhr und Bender, Attendorn [4.67], Schnorr [4.82] und Christian Bauer GmbH & Co. Welzheim [4.16] getragen, wobei zahlreiche wissenschaftliche Leistungen mit den Namen *K. H. Hertzler*, *K. H. Muhr*, *P. Niepage*, *G. Schremmer* und *K. Walz* verbunden sind (s. Kapitel 5).

#### 4.1.1.4 Röhrs-Schraubentellerfeder

Bei dieser besonderen Federform sind sowohl die Vorzüge der Schraubentellerfedern als auch die der Tellerfedern integriert. Damit treten Biege- und Torsionsspannungen auf und die Feder kann beiden Beanspruchungskategorien zugeordnet werden.

Ein vielseitiges Fertigungsprogramm mit einigen Besonderheiten weist die bereits 1920 in Magdeburg von *Hermann Röhrs* gegründete und 1946 nach Sonthofen im Allgäu verlagerte heutige Dr. Werner Röhrs KG auf. Neben der Produktion von Mehrdraht-(Litzen-) Schraubentellerfedern (Patent Röhrs),

Federn für Seilbahnausrüstungen und anderen hochbeanspruchten Federn aller Formen ist diese Firma Alleinhersteller der auf einem Patent von Dr. *Werner Röhrs* basierenden *Röhrs-Schraubentellerfeder*, die in **Bild 4.2a** dargestellt ist [4.5][4.27]. Sie besteht aus zwei gleichen, gegenläufig ineinandergeschraubten Schraubentellerfedern mit besonderem Flachprofil, so dass sich ein Äquivalent zu einer Tellerfedersäule mit spezifischen Vorteilen ergibt.



**Bild 4.2b:** Schraubendruckfeder aus rundem Draht

**Bild 4.2a:** Schraubentellerfeder Patent *Röhrs* [4.27]

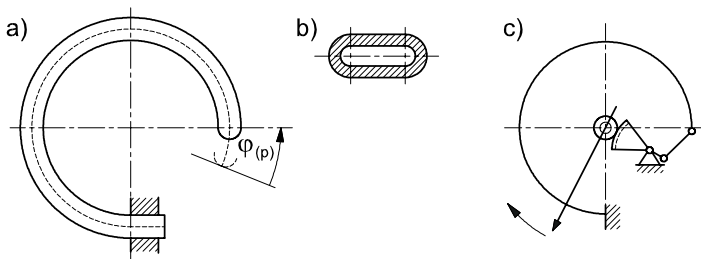
#### 4.1.1.5 Biegefedern in Druckmessgeräten

Das *Metallbarometer* (als Aneroidbarometer bezeichnet – a nerós = nicht feucht) geht auf eine Idee von *G. W. Leibniz* um 1700 zurück und wurde von *Lucien Vidie* (1805 – 1866) im Jahre 1844 zum Patent angemeldet. Die Dampfmaschinentechnik suchte schon seit langer Zeit nach einer vereinfachten Lösung der Druckmessung, die bis dahin mit Quecksilbermanometern (Flüssigkeitsbasis) erfolgte. Die Erfindung von *Vidie* bestand im wesentlichen aus einer luftleeren, allseitig geschlossenen, flachen zylindrischen Metalldose (deshalb auch die Bezeichnung „Dosenbarometer“) mit elastischen Deck- und Grundflächen aus Kupfer oder Messing, später auch aus Neusilber. Die Deckfläche bildete eine *gewellte Membranfeder*. Zwischen Boden und Deckel wurde eine Schraubendruckfeder (im *Vidie*-Patent



33 Stück) angebracht, um den auf ihr lastenden Luftdruck zu kompensieren [4.111].

Am 19. Juni 1849 lässt sich *Eugene Bourdon* (1808 – 1884) ein später mit seinem Namen verbundenes Metallbarometer patentieren, das aus einem flachen luftleeren Röhrchen besteht, welches zu einem Kreisbogen geformt ist. Den prinzipiellen Aufbau veranschaulicht **Bild 4.3**. Da die äußere Seite des Röhrchens eine größere Oberfläche als die innere Seite hat, bewirkt der auf das Röhrchen wirkende Luftdruck unterschiedlich große Kräfte, die eine Verformung des Röhrchens zur Folge haben. Diese Verformung der *Bourdon-Feder* wird über ein Hebelgetriebe auf einen Zeiger übertragen [4.110] [4.111].



**Bild 4.3:** Bourdon-Rohrfeder zum Messen von Drücken

a) Rohrfeder; b) Rohrquerschnitt; c) Prinzip der Messwertanzeige im Bourdon-Manometer

## 4.1.2 Torsionsbeanspruchte Federn (Schraubenfedern)

### 4.1.2.1 Allgemeines

*Draht* ist bereits sehr früh für die verschiedensten Federelemente verarbeitet worden (s. Bild 2.1 und Tafel 2.2). Von *Leonardo da Vinci* ist die Darstellung einer Schraubenfeder aus Draht überliefert (s. Bild 2.5). Zur Herstellung dieser Federn ist über viele Jahrzehnte die Wickeltechnik genutzt worden, bei der ein Draht auf einen Dorn aufgewickelt wurde. Auch hier waren zunächst Handwerker die Federfertiger, die diese Bauteile für ihre Produkte benötigten.

Die Technikentwicklung über Dampfmaschine, Eisenbahn und Automobil erforderte jedoch bald Schraubenfedern aus Draht in erheblichen Stückzah-

len. Diese Entwicklung führte Ende des 19. Jahrhunderts zur Herausbildung eigenständiger Fertigungsstätten für Schraubenfedern.

So eröffnen beispielsweise *Sigmund Scherdel* und *Friedrich Weiss* 1889 in Marktredwitz die Drahtzieherei Scherdel & Weiss. Schon bald nach der Gründung schließt sich der Klaviersaitendrahtfertigung die Verarbeitung federharter Drähte zu Speichen, biegsamen Wellen und Spiralfedern (der heutige Begriff „Schraubenfeder“ ist erst neueren Datums) an. Bereits 1893 experimentiert *Rudolf Diesel* an seinem ersten Schwerölmotor mit Ventilsfedern von Scherdel [4.4]. In **Bild 4.2b** ist die Grundform einer zylindrischen Schraubendruckfeder dargestellt.

Der Betrieb Technische Federn Sigmund Scherdel GmbH in Marktredwitz hat heute in der Ventilsfederfertigung einen bedeutenden Namen. Den hohen Bedarf der Industrie an Schraubenfedern der verschiedensten Formen decken zahlreiche größere und kleinere Unternehmen, die zum größten Teil im Verband der Deutschen Federindustrie (VDFI) zusammengeschlossen sind. Es ist hier nicht möglich, die über einhundert verschiedenen Fertigungsstätten zu nennen, die Draht verarbeiten und Schraubenfedern herstellen.

Eine bedeutende Rolle in der Drahtverarbeitung spielt die 1893 in Pfullingen von *Ernst Wagner* gegründete Maschinenfabrik, in der Metalldrähte geflochten oder verwoben wurden. 1914 wurde aus der nach Reutlingen umgesiedelten und durch die Firma Otto Schmid erweiterten Fabrik die heutige WAFIOS (**W**agner, **F**icker und **O.** Schmid) Maschinenfabrik Reutlingen. Diverse Drahtflechtautomaten, Biegemaschinen und Maschinen für die Polster- und Matratzen-Industrie wurden entwickelt und gebaut. Bereits 1912 war eine Schraubendruckfederwindemaschine durch Patent geschützt. In seiner Dissertation beschäftigte sich *Otto Schmid jun.* intensiv mit der Fertigungstechnologie von Schraubenfedern. Die von ihm entwickelten und durch Patente geschützten kupplungsgesteuerten Federwindmaschinen erlebten 1923 ihre Premiere. Durch ständige Verbesserungen und Weiterentwicklungen dieser Erfindungen galt diese Firma bereits 1932 als weltweit größter Anbieter von Drahtverarbeitungsanlagen.

Bis Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Schraubenfedern durch Wickeln um einen Dorn hergestellt. Erst durch Einführen des von *Schmid* entwickelten Verfahrens zum Winden setzte sich die Windetechnik langsam in der Schraubendruckfederproduktion durch.

Das Prinzip des Federwindens spielt seit dieser Zeit eine dominierende Rolle in der Fertigung von Schraubenfedern. In der heutigen Zeit ist es Mittelpunkt der computergesteuerten modernen Federwindautomaten mit einer hohen Produktivität und Variabilität in Bezug auf die Schraubendruckfederformen [4.62][4.24][4.14].

#### 4.1.2.2 Schraubendruckfedern

Mit der Weiterentwicklung von Fahrzeug- und Flugmotoren wurden immer höhere Ansprüche an die vor allem als Ventildruckfedern eingesetzten Schraubendruckfedern (s. Bild 4.2b) gestellt, die sich in zahlreichen Beiträgen zur Berechnung dieser Federn niederschlugen (s. a. Kapitel 5) und auch die Fertigung der Federn beeinflussten. Grundlegende Arbeiten dazu kamen von *E. Lehr* [4.58] und *A. Hußmann* [4.43]. Letzterer wies besonders auf die Bedeutung der Eigenfrequenz der Feder hin und lässt erkennen, dass der Übergang von der angelegten Windung zur Windung mit voller Steigung entscheidend sein kann. Neuere Untersuchungen dazu erfolgten von *St. Lutz* und *V. Geinitz* (s. Abschnitt 5.6.2) Die Gestaltung der Druckfeder kann somit ihre Lebensdauer entscheidend beeinflussen ( z.B. ungleichförmige Steigung, nichtlineare Kennlinie). *S. Gross* veröffentlichte dazu 1959 eine Berechnung [4.33]. Interessant hierzu auch [P20] und [4.68].

Die Lebensdauer von Ventildruckfedern wird natürlich auch vom Werkstoff und der Fertigungsart beeinflusst. Eine Vielzahl von Untersuchungen z.B. durch *v. Manteuffel* [4.60], *A. Pomp*; *M. Hempel* [4.72], oder *F. Bleilöb* und *H. Born* [4.11] dienten der Ermittlung der Dauerschwingeigenschaften von Federn unterschiedlicher Fertigungsart aus verschiedenen Werkstoffen. Es ist in diesem Zusammenhang bei Druckfedern für hohe schwingende Beanspruchung immer wieder die alte Frage „schlussvergüteter Draht oder schlussvergütete Federn“ gestellt worden [4.68]. Mit beiden Varianten und nachfolgendem Kugelstrahlen und Warmsetzen lassen sich günstige Eigenspannungsverteilungen als Voraussetzung für eine hohe Lebensdauer erzielen.

Schon frühzeitig befasste man sich mit der Veröffentlichung höchstzulässiger Beanspruchungswerte für Federn bei statischer als auch dynamischer Belastung [4.31][4.57].

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden weitere wesentliche Grundlagen zur Federberechnung geschaffen, sei es zur Frage der Drahtkrümmung durch *O. Göhner* [4.29] oder *A. Röver* [4.80], zur Knickfestigkeit durch *R. Grammel* [4.30] oder *E. Hurlbrink* [4.42] oder die Berechnung von Schraubendruckfedern mit rechteckigem Drahtquerschnitt durch *G. Liesecke* [4.59] bzw. *W. A. Wolf* [4.105].

In den frühen 1930er Jahren unternahm der DIN den Versuch (s. Kap. 6), die Abmessungen von Druckfedern zu normen, jedoch waren die Wünsche der Verbraucher weit auseinander gehend. 1958 konnte dann von *A. Jaesche* endlich über einen Vorschlag berichtet werden [4.45], der zur heute bekannten DIN 2098 führte. Allerdings beschränkte sich diese Normung nur auf Druckfedern. Im anderen Teil Deutschlands standardisierte man auch

erfolgreich die Abmessungen von Zugfedern [4.90]. Heute werden sowohl Druck- als auch Zugfedern als sog. Katalogfedern von verschiedenen Firmen auf dem Markt angeboten [4.50][4.51].

Schraubenfedern werden beim Drahtbruch unbrauchbar. Aus diesem Grunde wurden vor dem zweiten Weltkrieg für schlagartig belastete Federn Seile bzw. Litzen eingesetzt. Die sogenannte Litzen- oder Mehrdrahtfeder arbeitet weiter, wenn ein Draht bricht. Ihre Eigenschaften und Verwendung wurden ausführlich von *K. Walz* in [4.95] beschrieben. Zu den ersten Federhersteller für diese Federart gehörte die Fa. Röhrs in Magdeburg [4.65]. Heute haben Litzenfedern dort Bedeutung, wo eine hohe Bruchsicherheit und Eigendämpfung gefordert ist (s.a. Abschn. 4.1.2.4).

#### 4.1.2.3 Schraubenzugfedern

Als *Hooke* um 1660 das nach ihm benannte Hooke'sche Gesetz zur Proportionalität zwischen Kraft und Verformung formulierte, verwendete er für die Versuche Schraubenzugfedern (s. Bild 5.3). Aber so richtig begann die Massenfertigung von Zugfedern erst Anfang des 20. Jahrhunderts mit der rasanten Entwicklung des Maschinen- und Apparatebaues, z.B. mit der Produktion von Schreibmaschinen oder anderen mechanischen und elektrischen Geräten. Schon frühzeitig [4.106] [4.40] wurde erkannt, dass angebogene Ösen bei Zugfedern einen Schwachpunkt darstellen. Es hat deshalb nicht an Versuchen gefehlt, diesen Schwachpunkt zu vermeiden, in dem man das Ösenende unter die letzte Windung schiebt [P15], eine Doppelöse mit den letzten Windungen verbindet [P14] oder einen speziellen Schraubstopfen [P16] verwendet. Auch *J. Huhnen* selbst befasste sich mit dem „Ösenproblem“ und entwickelte den sogenannten hifo<sup>®</sup>-Haken [P17]. Er empfahl als beste konventionelle Methode eine Verringerung der Endwindung und der Öse auf 60 % des Durchmessers der übrigen federnden Windungen.

Mitunter ist auch die Vermeidung von Ösen zweckmäßig. So ist nach [P19] eine Zugfeder bekannt, die an den Enden kegelstumpffartige Windungspakete für eine Befestigung aufweist.

Da die Spannungen in den angebogenen Ösen für die Dauerschwingfestigkeit entscheiden sein können, standen diese im vergangenen Jahrhundert vielfach im Mittelpunkt spezieller Untersuchungen, siehe hierzu auch *P. Niepage* [4.70].

Die Arbeitsaufnahme einer Schraubenzugfeder hängt von der Größe der erzeugbaren „inneren Vorspannung“ ab. Wurden anfangs die Zugfederkörper mit Wickelbänken gewickelt, so war das kein allzu großes Problem. Mit

der Entwicklung der Federwindeautomaten war jedoch eine Absenkung der inneren Vorspannung verbunden. Durch Anwendung einer speziellen Drillwickeltechnik (siehe auch Abschnitt 4.3) entwickelte *J. Huhnen* [P18] die sogenannte hifo<sup>®</sup> – Zugfeder, die eine innere Vorspannung bis  $\tau_o = 650$  MPa aufweist [4.41] (s.a. [4.63]). Mit diesen Federn ist eine beachtliche Raumersparnis möglich.

#### 4.1.2.4 Mehrdrahtschraubenfedern (Litzenfedern)

Mehrdrahtfedern werden aus Drahtlitzen gefertigt. Der Litzenaufbau ist recht vielfältig [4.64][4.88] [4.112]. Neben Litzen mit Mitteldraht und mehr als sieben Seildrähten werden Litzen aus drei bis sechs Einzeldrähten ohne Mitteldraht verwendet. Mehrdrahtfedern finden als Schraubendruck-, Dreh- oder Formfedern Verwendung. **Bild 4.4** zeigt eine Mehrdrahtschraubendruckfeder und eine Litze aus vier Einzeldrähten. Ihre Vorteile gegenüber Eindrahtfedern liegen neben einem hohen Dämpfungsverhalten auch in einer höheren Lebensdauer bei schlagartigen Beanspruchungen [4.94] [4.65][4.88].

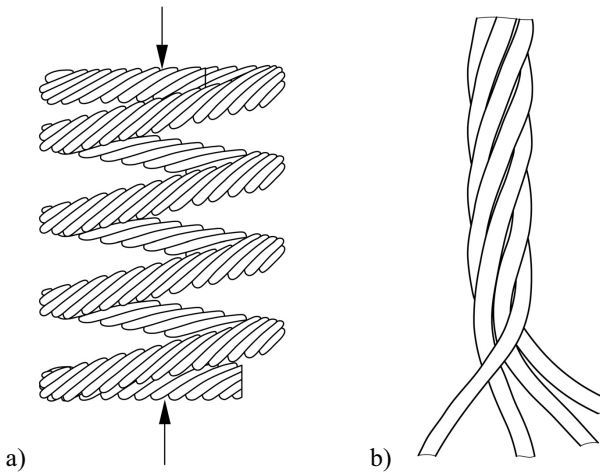
Aus Litzen von drei zusammengedrehten Drähten gefertigte Schraubenfedern wurden in russischen Maschinengewehren gefunden, die im spanischen Bürgerkrieg 1936/39 eingesetzt wurden [4.64][4.88]. Veröffentlichungen darüber in der damaligen Sowjetunion sind auf Grund der Verwendung dieser Federn in der Militärtechnik aus Geheimhaltungsgründen vermutlich nicht vorgenommen worden.

In Deutschland liegen erste Patente von Dr. *Werner Röhrs* [4.77] aus dem Jahr 1939 über eine Stabfeder vor, die aus mehreren Federstäben zusammengesetzt ist und auf Drehung beansprucht wird. In der Patentschrift wird bereits auf die Möglichkeit der Herstellung von Schraubendruck- und -zugfedern aus diesem Litzenmaterial hingewiesen. Weitere Patentschriften von Dr. *Werner Röhrs* beinhalten die Elastomerbeschichtung von Mehrdrahtfedern [4.78] und Möglichkeiten für eine Unterbindung des Wanderns der Litzendrähte bei dynamischer Beanspruchung [4.79].

Hinweise über die Verwendung von Mehrdrahtfedern in der Waffentechnik sind auch einem Bericht der Mauserwerke Oberndorf/Neckar aus dem Jahre 1943 zu entnehmen [4.95]. Hier wird über Untersuchungen berichtet, die an Schraubendruckfedern unter schlagartiger Beanspruchungen vorgenommen wurden, wobei auch Mehrdrahtfedern (Litzenfedern) hinsichtlich ihres Setz- und Festigkeitsverhaltens untersucht wurden. Bei den Untersuchungen zum Setzverhalten von Schraubendruckfedern wurden sowohl Eindraht- als auch Mehrdrahtfedern verwendet. Für Mehrdrahtfedern sind dabei auch Litzen

eingesetzt worden, deren Einzeldrähte beim Verseilvorgang verdreht wurden, um eine Torsionsvorspannung zu erzielen. Diesem Bericht ist zu entnehmen, dass bereits in der Zeit um 1940 auch in deutschen Waffen Mehrdrahtfedern eingesetzt wurden.

Über weitere Untersuchungen zu den Eigenschaften, insbesondere des Federungsverhaltens sowie zu Berechnungsmöglichkeiten von Mehrdrahtfedern wird in [4.95][4.94][4.88] und [4.17] berichtet. Fertigungsstätte dieser Mehrdrahtfedern mit langer Tradition sind vor allem die Federwerke W. Röhrs in Sonthofen/Allgäu [4.112].



**Bild 4.4:** Mehrdrahtfeder

a) Beispiel für eine Mehrdrahtschraubendruckfeder; b) Vieradrige Dahtlitze

#### 4.1.2.5 Drehstabfedern (Torsionsstabfedern)

Drehstäbe wurden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts als Fahrwerksfedern in Kraftfahrzeugen eingesetzt. Zur Befestigung dieser Federn wurden die Enden (Federköpfe) speziell gestaltet (Beispiele s. in [4.98]). Berichtet wird, das um 1930 im Modell „EMYHUIT“ des Automobilherstellers MATHIS in Straßburg (*Emil Ernst Karl Mathis* 1880 – 1956) Drehstabfedern für die einzeln aufgehängten Räder verwendet wurden. Im 2. Weltkrieg

wurden Drehstabfedern in Militärfahrzeugen (z.B. Schützenpanzerwagen) eingesetzt. *Ferdinand Porsche* (1875 – 1951) konstruierte verschiedene Drehstabfederungen. Ab 1950 wurde beispielsweise beim VW Käfer die Fünfblatt-Drehfeder eingeführt. Drehstabfeder im Achsquerrohr, Querrohrabhängungen und Drehstabilisatoren sind weitere Konstruktionsformen, in denen Drehstäbe für Fahrzeugfederungen zum Einsatz kommen (s. Abschnitt 4.1.4).

Hersteller von Drehstabfedern sind die Firmen Germaniawerk Schubert GmbH & Co KG in Berlin, Alfred Kron GmbH in Solingen, Gebr. Schmidt Federnspezialfabrik GmbH in Wuppertal, Schweizer GmbH in Reutlingen und Walk Federntechnik in Lüdenscheid.

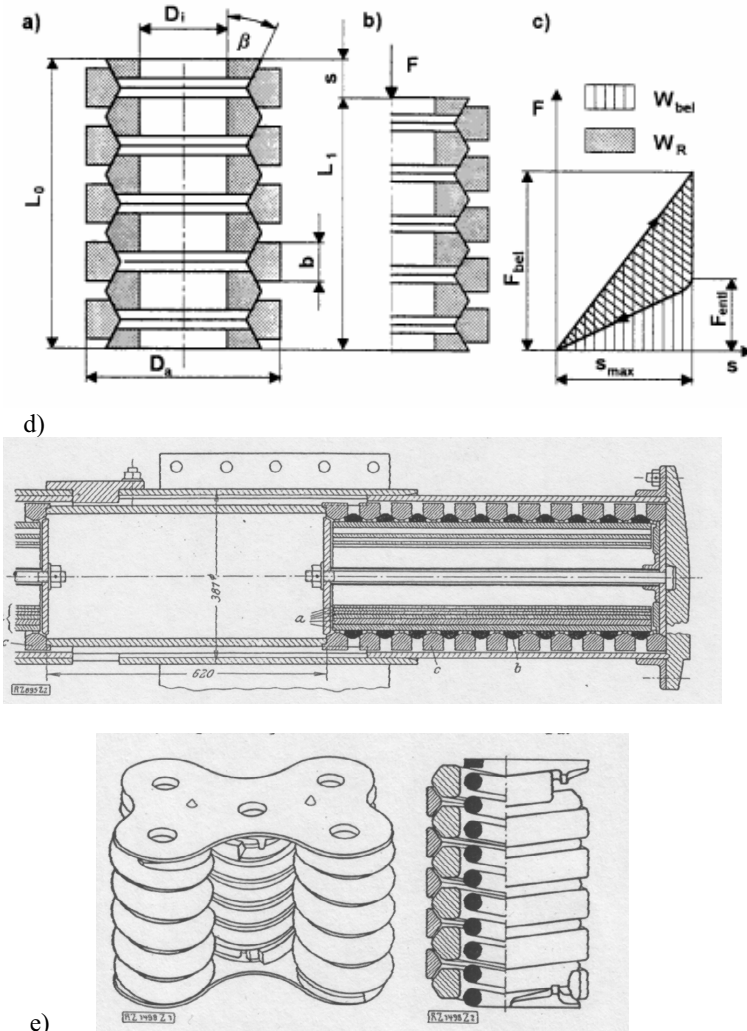
### 4.1.3 Zug- und druckbeanspruchte Feder (Ringfeder)

Nach dem ersten Weltkrieg übernahm die 1898 gegründete Waggonfabrik Uerdingen AG im Zuge des Waggonbaus für die Staatsbahnen auch die Entwicklung von Federapparaten für die Zugeinrichtungen der Waggons als auch die für neuartige Reibungspuffer. Im Mittelpunkt stand die im Jahre 1920 von *E. Kreissig* [4.55] (s. Tafel 2.2) zum Patent angemeldete Ringfeder, die aus Ringen mit innen/außen konischen Flächen geschichtet wurde (**Bild 4.4**). Das führte zu einer wesentlichen Erweiterung der Produktpalette, die über den Waggonbau hinausging und 1922 zur Gründung der RINGFEDER® GmbH führte [4.73].

Heute ist dieses Unternehmen mit einer breiten Produktpalette des weiten Anwendungsfeldes der Ringfeder, die vor allem auch als Spannelement genutzt werden kann, führend auf diesem Spezialgebiet der Federntechnik.

### 4.1.4 Fahrzeugfedern

In Fahrzeugen (Wagen, Kutschen, Straßen- und Schienenfahrzeugen) kommen als Federelemente zur Abfederung der Fahrzeuge neben Metallfedern auch Gas-, Elastomer- und Faserverbundfedern zum Einsatz, die an dieser Stelle der Vollständigkeit halber mit behandelt werden sollen. Zu den Metallfedern – fast ausschließlich Stahlfedern – gehören Blatt-, Drehstab-, und Schraubendruckfedern sowie Stabilisatoren in recht verschiedenen Ausführungen. In Schienenfahrzeugen kommen beispielsweise Kegelstumpf-, Teller-, Ring- und Wickelreibungsfedern für den Einsatz in Puffern hinzu.



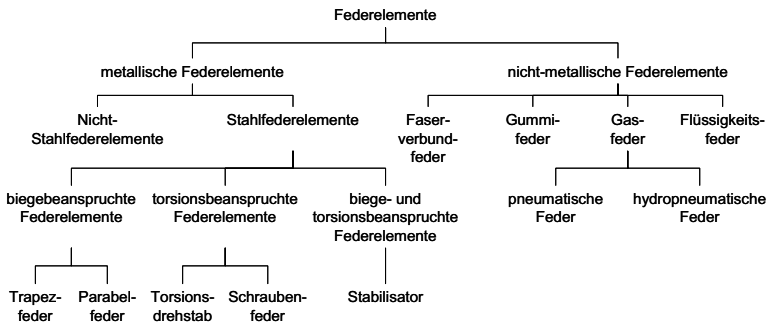
**Bild 4.5:** Ringfedern und Einsatzbeispiele

- a) Ringfedersäule, unbelastet; b) Ringfedersäule, belastet; c) Federkennlinie  
 d) Pufferfeder Bauart Mohr für Prellböcke 1925 [4.81] e) Ansicht und Schnitt durch einen Schraubenfedern/Reibungsfeder-Block für einen Güterwagen 1928 [4.66]



Es würde zu weit führen, auf all diese Federelemente einzugehen. Nur ein grober geschichtlicher Abriss der meistverwendeten Federarten ist hier möglich. **Tafel 4.1** enthält einen Überblick über die Federarten im Fahrwerk von Fahrzeugen.

**Tafel 4.1.** Federelemente im Fahrwerk



#### 4.1.4.1 Blattfedern

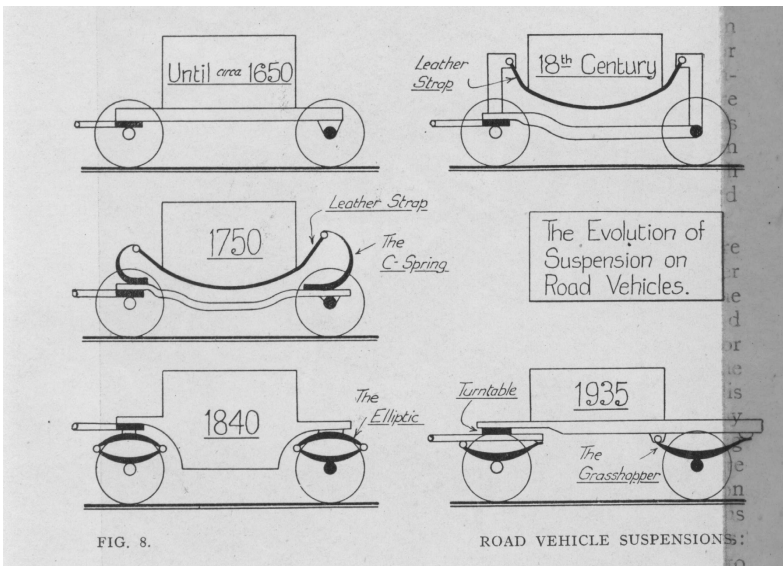
Bereits im Mittelalter wurden zur Abfederung von Wagen und Kutschen *Blattfedern* verwendet. Beispiele für die dafür meist verwendeten Federformen sind in **Bild 4.6** dargestellt.

Vollelliptik-Federn wurden auch in den ersten Automobilen zur Abfederung verwendet, da sie in dieser Ausführung bereits von den Postkutschen her bekannt waren. Diese Vollelliptik-Feder von *Obadiah Elliott* wurde 1804 in England patentiert [4.85][4.89] und setzte sich allmählich als bessere Alternative gegen die Lederriemen-Aufhängung bzw. C-Feder mit nachgeschalteten Lederriemen aus dem frühen bzw. mittleren 18. Jahrhundert für den Kutschenaufbau durch (**Bild 4.6**). Jedoch war auch noch der Personenwagen der ersten Pferdeschienenbahn auf dem europäischen Festland zwischen Linz und Budweis 1828 mit der C-Feder-Riemen-Anbindung ausgeführt. Einige Beispiele von Kutschen-Federungen zeigt auch **Bild 4.7** [4.89].

Mit der Vollelliptik-Feder konnte trotz der damaligen Kürze dieser Federn ein einigermaßen akzeptables Durchfedern erreicht werden. Hinzu kam, dass die Feder sowohl achsseitig als auch an der Karosse an nur je einer zentralen Stelle angebunden werden brauchte und somit die Federlängenänderungen beim Durchfedern an den freien Verbindungspunkten der beiden

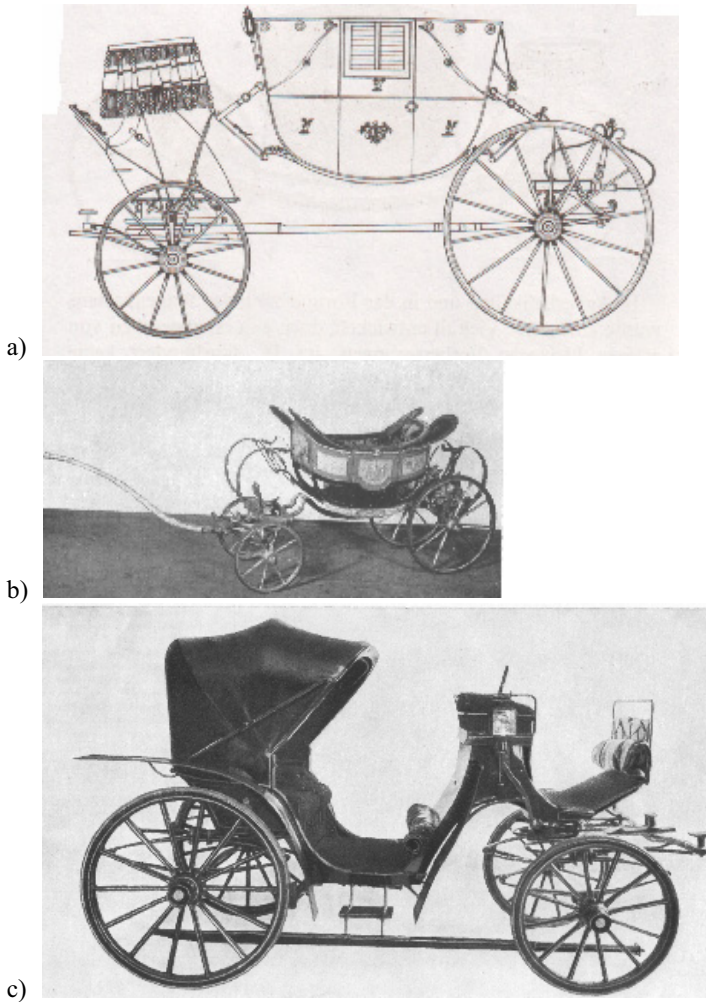
Teilfedern ohne besondere Zusatzkonstruktionen aufgenommen werden konnten (s. dazu auch Bild 5.16).

Mit dem Übergang zur Halbelliptikfeder, seit etwa 1840 bekannt und im Automobil mit meist vorderem Festlager an dem zu einer Federhand ausgeformten vorderen Rahmenteil und mit hinten angeordneter Federlasche – Schäkel genannt – zwischen hinterem Federauge und Federbock angeordnet, ergab sich dann eine bessere Achsführung durch den erheblich vergrößerten Anbindungsabstand am Rahmen.



**Bild 4.6:** Straßenfahrzeugaufhängungen [4.85]

Die Vorteile von abgefederten Fahrzeugen zur Verbesserung des Fahrkomforts waren schon bei den Kutschen erkannt worden und wurden auch schon entsprechend „vermarktet“: In einer Darstellung der Postverbindungen im Sauer- und Siegerland von 1838 wird zur täglichen Schnellpost, die „samt Beiwagen achtzehn waghalsige Passagiere mitnimmt“, auf ihrer Route von Elberfeld über Siegen nach Frankfurt neben dem Vierergespann besonders auf die Reise „in Federn“ hingewiesen [4.9]. Mit der rasanten Schnelligkeit von 1 deutschen Landmeile (7.500 m) je Stunde jagte dieses Fahrzeug durch Tag und Nacht.



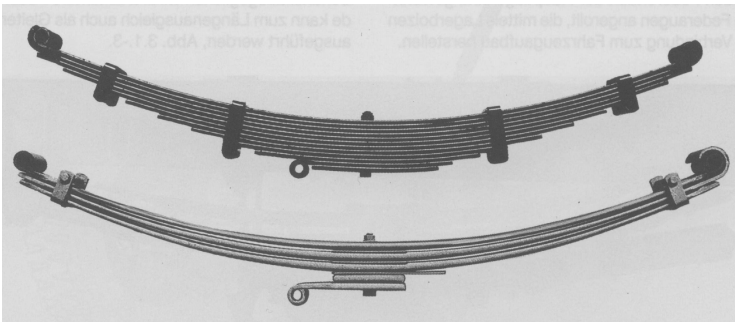
**Bild 4.7:** Kutschen mit Stahlfedern verschiedener Formen [4.89]  
 a) Englische Stadtkutsche mit F-Feder; b) Kinder-Phaeton des Königs von Rom um 1813 mit C-Federn; c) Kutsche „Viktoria“ mit Volllelliptiktragfedern (Science Museum London)

Dem Schutz vor Staub, Schmutz und Wasser dienten gelegentlich lederne Federgamaschen [4.34] in die die gefetteten Federn eingepackt wurden, um keine Federbrüche durch Korrosion herbeizuführen und den Fahrkomfort durch niedrige Reibung zwischen den Blättern zu erhalten.

Progressive Blattfedern mit unter der Hauptfeder angeordneter Abwälz- oder Stützfeder, mit Gleitböcken zur Federlängenverkürzung bei Einfederung oder oberhalb der Hauptfeder liegender Zusatzfeder entstanden, um die Einsatzbedingungen zu erfüllen. Mit ungleich langen Federarmen und gezielter Anbindung der beiden Federaugen in unterschiedlichen Höhen über Fahrbahnniveau konnten das Eigenlenkverhalten verbessert und die Winkeländerung zwischen Kardanwelle und Differential minimiert werden.

Seit 1963 wird neben der geschichteten Trapezfeder die Parabelfeder als Einblatt- oder Mehrblattfeder eingeführt [4.75]. Die Vorteile dieser Feder führen zu ihrem Einsatz im Transporter, LKW und Omnibus [4.20], im Anhänger [4.19] und Schienenfahrzeug.

Aus technischer Sicht werden als Vorteile der Parabelfeder gegenüber der Trapezfeder genannt: höhere Beanspruchbarkeit, geringeres Federgewicht, wenig veränderliche Reibung, besserer Korrosionsschutz, kleinere Pakethöhe, wenige Federlagen (**Bild 4.8**). Erste deutsche Fahrzeuge mit Parabelfedern sind Ende der 1960er Jahre beispielsweise der Ford-Transit mit vorderer Einblattfeder, der MAN-Bus mit einlagiger Parabelführungsfeder und paralleler Luftfeder, der Büssing-Lastkraftwagen mit zweistufiger (3+1)-lagiger Hinterfeder sowie der Opel-Kadett mit vorderer Querblattfeder. Auch das Dreiachs-Aggregat der Bergischen Achsenfabrik wird mit 3-lagigen Parabelfedern ausgerüstet. Später kommen Parabellenker in Verbindung mit Luftbälgen hinzu.



**Bild 4.8:** Trapezfeder und Parabelfeder gleicher Tragfähigkeit [4.34]

In den 1970er Jahren verwenden alle Fahrzeughersteller Parabelfedern und nur für Baufahrzeuge und den Fahrzeugeinsatz in sogenannten Schlechtwegländern greift man vorläufig weiterhin auf die konventionelle Trapezfeder zurück.

Eine gewisse Abkehr von der Trapezfeder hatte für PKW schon in den 1930er Jahren eingesetzt. Man suchte Lösungen, die eine konstruktive Trennung der in einer Blattfeder vereinigten Funktionen – wie Federung, Führung, Dämpfung und Aufnahme von Schubkräften – erlaubten [4.15].

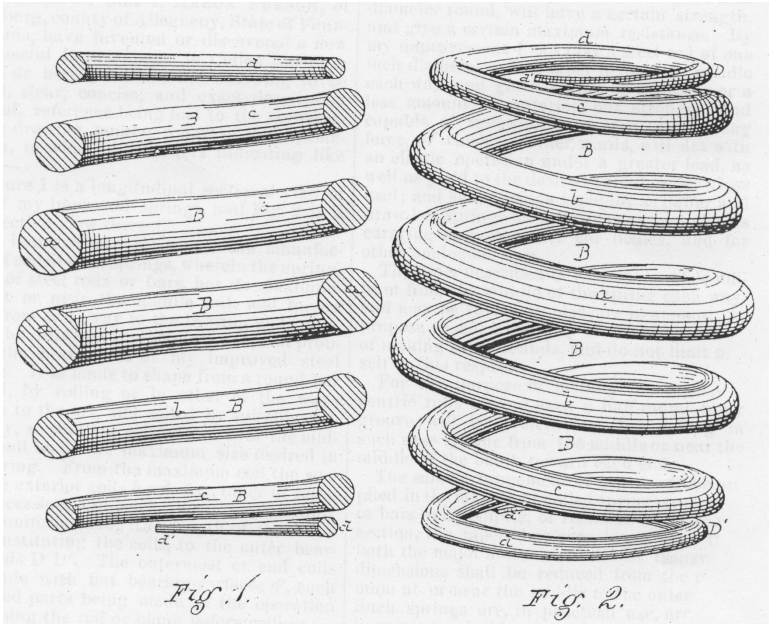
#### 4.1.4.2 Schraubendruckfedern

*Schraubendruckfedern*, die bereits 1892 im Daimler-„Riemenwagen“ erstmals im Automobil Verwendung fanden, wurden vor allem für unabhängige Einzelradaufhängungen Anfang des 20. Jahrhunderts eingesetzt. Serienmäßig eingebaut wird sie 1910 von *H. F. S. Morgan* in Großbritannien und 1922 von *Vincenzo Lancia* in Italien [4.93]. Schließlich führt das ernste Problem des Flattern der Lenkräder in den 1920er Jahren zur Forderung an Radführungen, dass die Radebene bei Federbewegungen des Rades parallel zu sich selbst bleiben soll [4.61]. In vielen Ausführungen als Zylinderführung, Führung an Längslenkern oder Parallelführung mit Querlenkern werden Schraubenfedern vorgesehen. In der Praxis ist ein weiterer Vorteil die gegenüber Blattfedern geringere Masse der torsionsbeanspruchten Schraubenfedern, die etwa nur ein Drittel für gleiche Arbeitsaufnahme ausmacht.

Mit den Neukonstruktionen nach dem 2. Weltkrieg versuchte man auch die Schwächen der Schraubendruckfeder zu umgehen. Die gewünschte progressive Federkennlinie wird zunächst durch inkonstante Steigung der einzelnen Windungen verwirklicht, so dass sich mit zunehmender Einfederung Windungen mit kleinerer Steigung kontinuierlich aneinander legen, so ihre Federwirkung verlieren und zur Progression führen.

Man erkennt schnell den zu großen Materialeinsatz in den frühzeitig abgeschalteten Windungen und reduziert in diesen Windungen den Drahtdurchmesser, der sich von einem dünnsten Drahtquerschnitt über konische Stabstücke bis zum dicksten Drahtdurchmesser ändert. Diese sogenannte superprogressive Schraubendruckfeder [4.91] erreicht Anfang der 1970er Jahre große Stückzahlen bei ihrem Serieneinsatz in den von hoher Zuladung betroffenen Hinterachsen. Eine US-amerikanische Patentanmeldung dieser Schraubenfedervariante datiert bereits aus dem Jahre 1876 unter Patent-Nr. 176174 (**Bild 4.9**). Ihre Nachteile – Geräusche der aufeinander abwälzenden Progressivwindungen und Korrosionsanfälligkeit durch Zerstörung der Lackierung – werden zunächst durch übergezogene Schläuche und dann

durch Übergang auf die Trichterfeder, eine kegelförmige mit zylindrischem Mittelteil versehene Schraubenfeder, beseitigt.

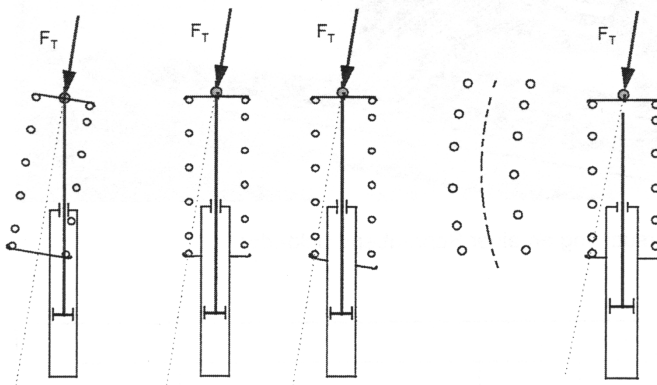


**Bild 4.9:** Schraubenfeder mit inkonstantem Stabdurchmesser und konstantem inneren Wickeldurchmesser nach US-Patent 176174

Schließlich wird im Jahr 1979 die Miniblofeder [4.22] mit tonnenförmiger Gestalt und spiralförmig ineinander sich legenden Windungen an der Hinterachse des VW-Transporters und an der Hinterachse des Opel-Senators serienmäßig verwendet. Sie stellt das Ende einer erfolgreichen Weiterentwicklung dar; nicht nur zur Erzeugung der Progression sondern auch als variables Federelement bezüglich Bauhöhe und Windungsdurchmesser.

In McPherson-Federbeinen kommt es zum Einsatz von Pigtailfedern, an denen eine oder beide Endwindungen gegenüber den übrigen Windungen kleinere Wickeldurchmesser aufweisen. Dadurch werden die Windungsberührungen der angelegten Endwindungen vermieden und somit Korrosionsbrüche an diesen Stellen verhindert.

Um das leichte Ansprechen der Federung auch bei kleineren Federbewegungen in McPhersonbeinen zu verbessern, wird neben einer schrägen Federstellung zur Dämpferachse oder schräg angeordnetem Federteller auch die Schraubenfeder mit im entlasteten Zustand gekrümmter bzw. s-förmiger Federmittellinie eingesetzt (**Bild 4.10**).



**Bild 4.10:** Minimierung der Reibkräfte durch spezielle Federwirkungen

#### 4.1.4.3 Drehstabfedern

Wenn man bedenkt, dass zur Erklärung der Torsionsbeanspruchung einer Schraubenfeder, diese als aufgewickelter *Drehstab* verständlich gemacht wird, so wundert man sich über die allgemeine Verwendung des Drehstabs, die erst zu Beginn der 1930er Jahre im Automobil einsetzt. Die Drehstabfeder, bei der ein elastischer Federstab auf Verdrehung um seine Längsachse beansprucht wird, wird im Ergänzungsband des Automobiltechnischen Handbuchs [4.15] aus dem Jahre 1935 als neueste und erfolversprechendste Art der rein elastischen Federung bezeichnet.

*Sanders* verweist in seinem zweibändigen Werk [4.85] auf sein früheres Buch „Springs and Suspension“ von 1930, in dem er die Drehstablösung nicht erwähnte, da sie zu der Zeit praktisch nicht existierte.

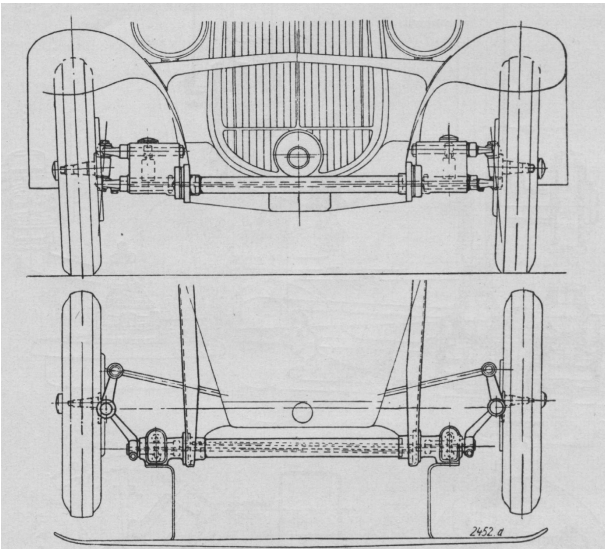
Das hatte sich zwischenzeitlich insbesondere durch die Arbeiten von Ferdinand Porsche (**Bild 4.11**) grundlegend geändert. Erste Anwendungen erfolgten in den PKW's von Röhr, Mathis und Citroën bis dann der endgültige Durchbruch im legendären Volkswagen-Käfer gelang.

Ein Hauptgrund für den späten Einsatz dieser Konstruktion waren die Befestigungen des an sich einfachen Bauteils an seinen beiden Enden. Neben Rundmaterial wurden auch schon frühzeitig geschichtete Flachbündel aus Rechteckstäben verwendet.

In der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde sicherlich Frankreich das Land, welches eine überwiegende Anzahl von Fahrzeugen mit Drehstäben ausrüstete.

Die hohen Kosten, die insbesondere durch die mechanische Bearbeitung der Verzahnungen bedingt sind, führten schließlich zur Ablösung durch die Schraubenfeder.

Für hochleistungsfähige Sonderkonstruktionen, die beispielsweise in Kettenpanzern üblich sind, ist der Drehstab jedoch auch zu Beginn des 21. Jahrhunderts das am besten geeignete Federelement.

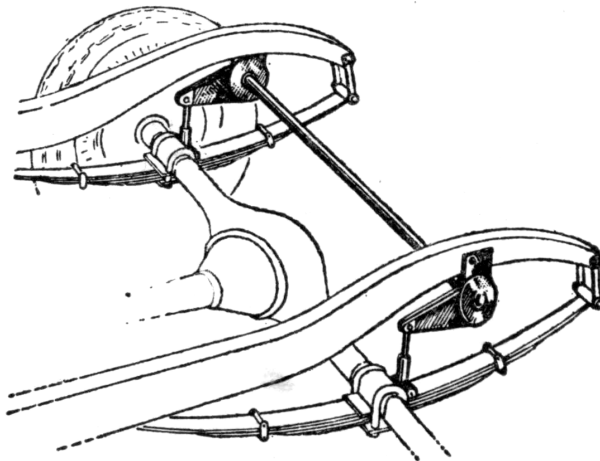


**Bild 4.11:** Ansicht der Drehstabfederung nach Prof. *Porsche* [4.15]



#### 4.1.4.4 Stabilisatoren

Als nichttragendes Bauteil hat der *Stabilisator*, ebenfalls seit den frühen 1930er Jahren, Eingang in den Fahrzeugbau gefunden. Seine Grundaufgabe war zunächst, die Kurvenneigung des Fahrzeugaufbaus trotz weicherer Federn zu verringern. Man erkannte später aber auch seinen Einfluss auf das Über- und Untersteuern der Fahrzeuge, indem man an Vorder- und Hinterachse die Stabilisatorwirkungen entsprechend aufteilte.

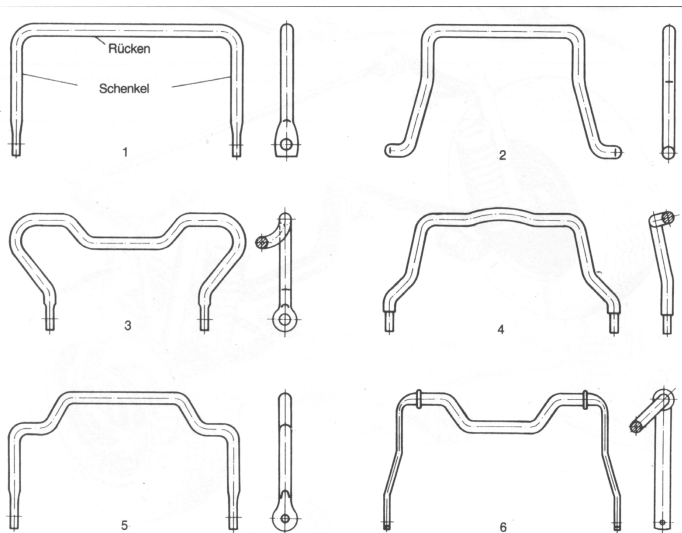


**Bild 4.12:** Stabilisator, Bauart Roumens [4.15]

Anfangs [4.15] koppelte man die Reibungsstoßdämpfer an jeder Radseite einer Achse mit einer Verbindungsstange (Bauart Roumens, **Bild 4.12**) oder verband wechselseitig die Hoch- und Niederdruckkammern von hydraulischen Hebelstoßdämpfern auf beiden Radseiten durch entsprechende Leitungen (System Stabilus), bis dann die u-förmig gebogenen, einstückigen Bauteile aus Federstahl (**Bild 4.13**) entstanden. Manchmal wurden die Schenkel der Stabilisatoren auch als Radführungsglieder zusätzlich herangezogen, um mit einem einfachen Querlenker einen Dreieckverband zu bilden.

Der Rücken des Stabilisators hatte immer einen Kreis- oder auch Kreisringquerschnitt, während die Schenkel manchmal rechteckförmig ausgewalzt

wurden. Zum aktiven Bauelement wurde der Stabilisator zu Beginn des 21. Jahrhunderts, indem man den Rücken teilte und beide Teile mit einem hydraulischen Aktuator verband, über den Stabilisierungsmomente zur Minimierung oder Beseitigung der Wankneigung bei Kurvenfahrt eingeleitet wurden [4.54]. Eine einfachere Lösung findet man im Marktsegment der Sport Utility Vehicles (SUV) mit zu- und abschaltbaren Stabilisatoren bei Straßen- bzw. Geländefahrt [4.69][4.7].



**Bild 4.13:** Stabilisatorformen [4.34]

#### 4.1.4.5 Gummifedern

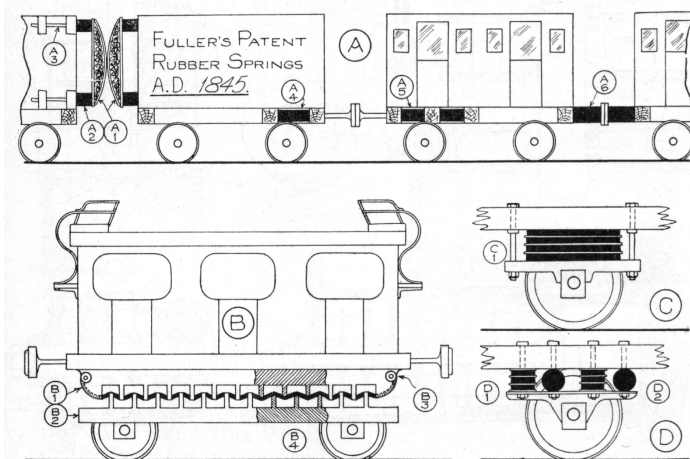
Die *Gummifeder* kam zum Einsatz in Schienenfahrzeugen, nachdem die Vulkanisation durch Goodyear in den USA im Jahre 1839 angewendet wurde (**Bild 4.14**). Im 19. Jahrhundert werden eine Fülle von Erfindungen zum Einsatz von Gummifedern gemacht. Im Automobil jedoch erfolgt ihre Anwendung erst etwa 90 Jahre nach ihrer Einführung [4.85].

Sie deckt hier ein breites Anwendungsgebiet als Lenkerlager, Aggregatlager und Zusatzfeder ab. Auch zur Abfederung des innovativen englischen Mini wurde sie eingesetzt und fand Verwendung als schubbeanspruchte Radsatz-

feder im Schienenfahrzeug. Von Vorteil war die progressive Federkennlinie, während die Kriechneigung und Alterung des Gummis als negative Seiten angesehen wurden und zur Abkehr als Fahrwerksfeder führten.

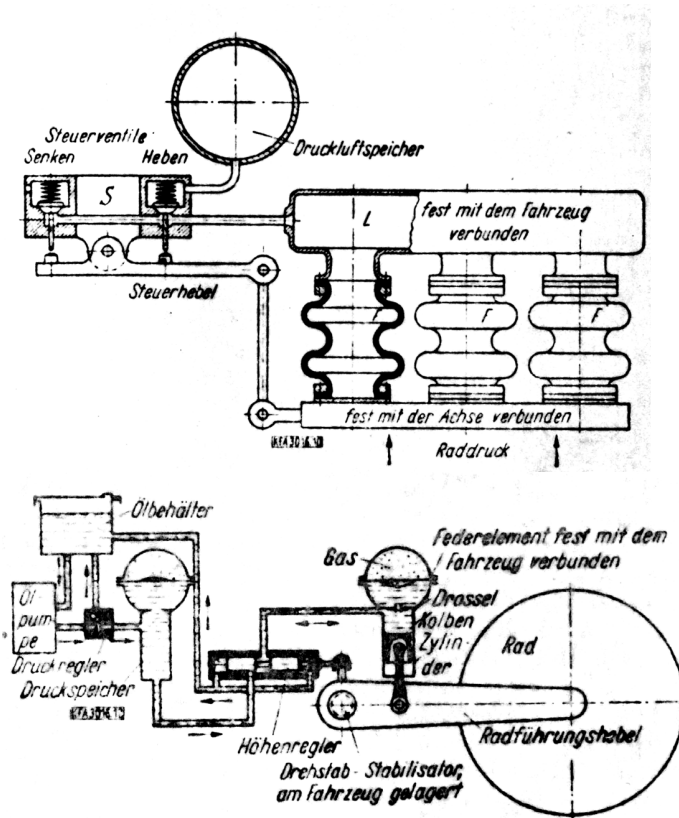
#### 4.1.4.6 Gasfederungssysteme

Der Stahlfeder sind mit der Einführung der *Gasfederungssysteme* in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert ernsthafte Konkurrenten entstanden. Ihr Hauptvorteil liegt in der beladungs-, fahrbahn- und geschwindigkeitsabhängigen mechanischen oder elektronischen Höhenniveauregulierung, so dass der konstruktiv vorgegebene Federweg vollständig für die dynamischen Schwingbewegungen zur Verfügung steht und bei Beladungsänderungen nicht durch den statischen Federweg eingeschränkt wird. Zur Niveauregulierung bestehen grundsätzlich zwei Alternativen (**Bild 4.15**): die Regelung durch unterschiedliche Gasfüllung oder unterschiedliche Ölfüllung bei konstanter Gasmenge [4.48]. Zur ersten Art gehören die Luftfederung des Mercedes Typ 600 [4.100] von 1963 sowie Ausführungen für Omnibusse [4.93] und LKW. Zur zweiten Art zählt insbesondere die Entwicklung der Hydro-pneumatik für die Citroën-Fahrzeuge 15 CV und DS 19 [4.47] Mitte der 1950er Jahre.



**Bild 4.14:** Fuller's Patente von 1845 zu Gummifedern im Schienenfahrzeug [4.85]

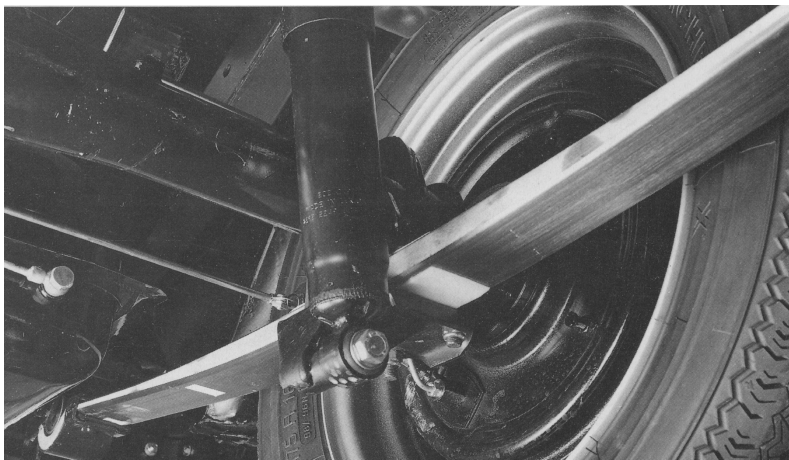
Im Gegensatz zur hydropneumatischen Feder, deren belastungsabhängige Eigenfrequenz ganz im Gegensatz zur linearen Stahlfeder mit steigender Last zunimmt, bleibt bei der Luftfeder die Eigenfrequenz im gesamten Belastungsbereich in etwa konstant. Durch Beseitigung der früheren Funktionsstörungen, wie Einfrieren der Regelventile und Komfortbeeinträchtigung durch schlechtes Anfederverhalten, stellt die Luftfeder heute das geeignetste Federsystem zum Aufbau von elektronisch geregelten adaptiven oder aktiven Fahrwerkssystemen dar [4.98].



**Bild 4.15:** Schematische Anordnung von Federungen mit unterschiedlicher Gasfüllung (links) bzw. unterschiedlicher Ölfüllung (rechts) [4.48]

#### 4.1.4.7 Kunststofffedern

Schließlich muss auch die *Kunststofffeder* aus meist glasfaserverstärktem Epoxydharz (**Bild 4.16**) erwähnt werden, die 1979 in den USA in das Sportfahrzeug GM-Corvette eingebaut wurde. Intensiv wurde in den 1980er Jahren von fast allen Blattfeder-Herstellern in Deutschland an dieser Alternative entwickelt mit Konzentrierung ihres Einsatzes im Transporter- und LKW-Bereich [4.102]. Vom Verband der Deutschen Federnindustrie (VDFI) wurde eine Studie [4.92] in Auftrag gegeben, um die Chancen dieser Feder auszuloten. Die hohen Kosten, Recycling-Probleme und die auch hier fehlende Niveauregulierung führten schließlich 1990 zur Einstellung der Entwicklungsaktivitäten, obwohl einige wenige Typen im letzten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts in Serie gingen



**Bild 4.16:** Blattfeder aus glasfaserverstärktem Kunststoff [4.93]

## 4.2 Verfahren und Einrichtungen für die Warmformgebung von Fahrzeugfedern

Der Fertigungsablauf warmgeformter Stahlfedern gliedert sich immer in die drei Fertigungsgruppen Vorfertigung, Vergütung und Nachbehandlungen mit Fertigstellung. Je nach Federart sind die Fertigungsgruppen mehr oder weniger umfangreich ausgeprägt.

Warmgeformte Federn werden häufig in Fahrzeugen aller Art eingesetzt. Deshalb soll die Warmformgebung von Federn an derartigen Federn dargestellt werden.

### 4.2.1 Vorfertigung

#### 4.2.1.1 Blattfedernvorfertigung

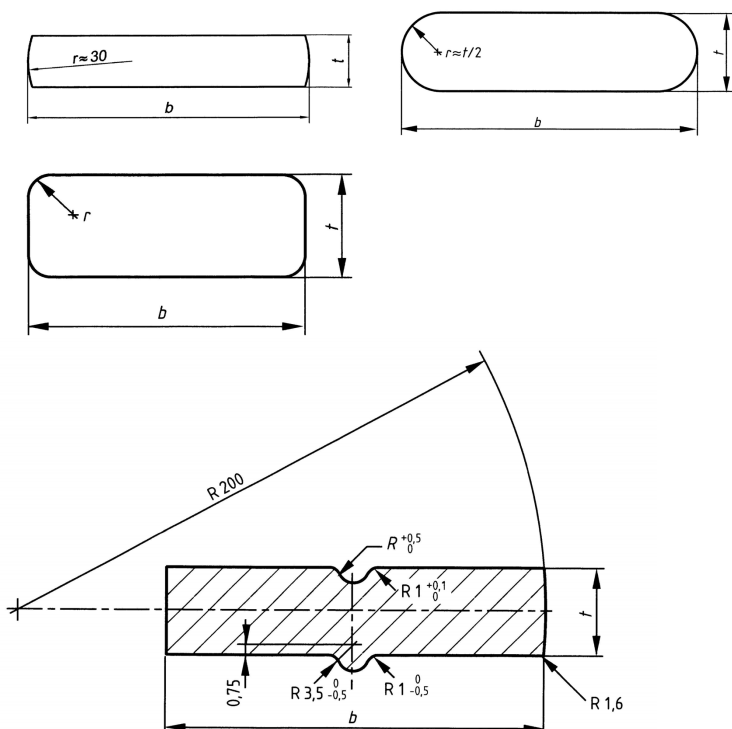
Für *Blattfedern* wird das Vormaterial in 6 bis 7 Meter langen Stäben des benötigten Querschnittes oder aber auch schon in einsetzbarer Länge angeliefert.

Gegenwärtig existieren in Deutschland vier verschiedene Federstahlnormen (**Bild 4.17**): DIN 4620 (Ausgabe 11/1992) mit gerundeten Schmalseiten, DIN 59145 (Ausgabe 06/1985) mit halbkreisförmigen Schmalseiten, DIN 59146 (Ausgabe 11/1992) mit rechteckigem Querschnitt und gerundeten Kanten und DIN 1570 (Ausgabe 02/1979) gerippter Federstahl, die demnächst alle in der europäischen Norm EN 10092-1 bzw. EN 10092-2 für das gerippte Profil zusammengefasst werden.

DIN 4620 hat sich aus den Urformen der rechteckigen Federblattprofile entwickelt. In [4.25] wird von den unablässigen Bemühungen berichtet, bei Krupp nicht nur den Federstahl zu verbessern, sondern auch die Federform so zweckmäßig wie möglich zu gestalten. Bereits um das Jahr 1850 konnte so *Alfred Krupp* seine patentierte Rippenfeder, deren Federblätter mit Mittelrippe versehen waren, auf den Markt bringen.

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden verschiedene Querschnitte (**Bild 4.18**) patentiert, um durch Aussparungen auf der Druckseite Längskanäle zum Einpressen von Fett zu erreichen. Damit sollte die Reibung reduziert und auf niedrigem Niveau möglichst konstant gehalten werden. Eine Broschüre [4.38] aus dem Hoesch-Federwerk stellt das Dauer-Schmieresystem für Blattfedern vor. Für leichte Ausführungen dieser „Schmierfedern“ wurde das Rechteckprofil auf beiden Seiten schwach hohlgewalzt, während für schwere Ausführungen auf der Druckseite des Profils ein tiefer

Schmierkanal im mittleren Drittel der Blattbreite eingewalzt wurde, dessen Tiefe zwischen 30 % und 60 % der Blattdicke betrug. Der Verschluss dieser Kanäle an den Blattenden erfolgte bei der leichten Ausführung durch Filzstreifen, die in eingedrückten Aussparungen an den Blattenden festsitzen, und bei der schweren Ausführung mittels zugeseitig herausgedrückten Verrippungswarzen, die in den druckseitig vorhandenen Kanal des oberhalb angeordneten Blattes passten und gleichzeitig die Blätter gegen Ausfächern miteinander verriegelten.



**Bild 4.17:** Federstahlprofile

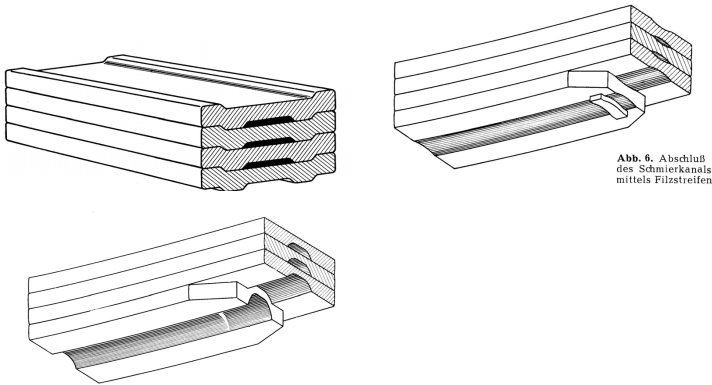


Abb. 8. Abschluß  
des Schmierkanals  
mittels Filtzstreifen

**Bild 4.18:** Blattprofile mit Längskanälen für Schmiermittel nach Krupp, links, [4.25] bzw. Hoesch [4.38]

Die Abschmierung erfolgte bei Eisenbahnfedern mittels einer Hochdruckpresse über den mit Schmiernippel versehenen Federbund und die durchbohrten Mittelwarzen der Blätter. Erwähnt wird als weiterer Vorteil von Profilen mit druckseitigen Aussparungen die Verlagerung der neutralen Faser zur Zugseite hin, wodurch die rechnerischen Spannungen dieser bruchgefährdeten Seite gegenüber der Druckseite reduziert werden.

Das Vormaterial aus den ins Federnwerk angelieferten langen Stäben wird in einem ersten Arbeitsgang auf die notwendige Länge gebracht. Hierzu eignen sich Scheren, die die Blattlängen kalt abscheren. Bei den größeren Dicken für die Parabelfedern werden hartmetallbestückte Kreissägen verwendet.

Zur Vorfertigung gehören das Stanzen des Mittellocks und der Klammerlöcher, der Endenschnitt bzw. Trapezschnitt. Meistens nutzt man die Materialerwärmung, um die notwendigen Kräfte klein zu halten. Auch Mittelwarzen, Rippe/Rille-Ausbildungen, Verkröpfungen, Einprägen von Sachnummern und das Augenrollen sind wie auch die Blattdickenkontur bei Blättern für die Parabelfedern Vorfertigungsschritte. Bei dicken Blättern wird das Mittelloch gebohrt.

Für Trapezfedern gab es unterschiedliche Ausbildungen der Enden von nachfolgenden Lagen. An den alten Kutschwagenfedern wurden diese Blätter in der Draufsicht etwa parabelförmig und in der Seitensicht mit sich verjüngender Dicke ausgeführt. Um der rechnerisch exakten Dreieckfeder nahe zu kommen, spitzte man bei konstant gehaltener Blattdicke die Blätter



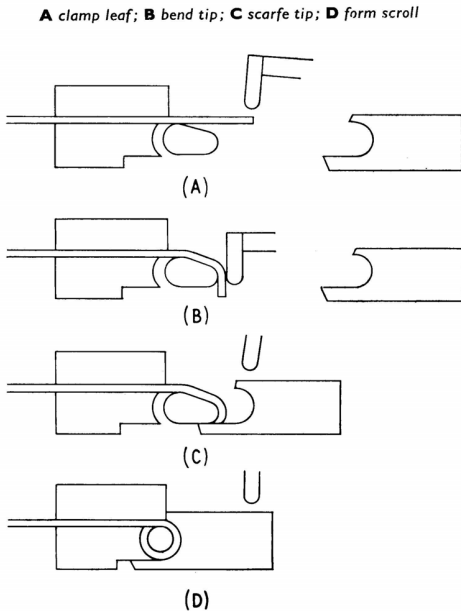
dreieckförmig an. Weit verbreitet war das kurze Auswalzen der Enden auf Segmentwalzen. Damit sich die kürzere Lage nicht in den Querschnitt des darüber liegenden Blattes im Laufe der Zeit einarbeitete, wurde das äußerste Ende mit einem Radius leicht abgebogen. Erwähnt werden müssen Abkantungen von  $90^\circ$  und auch das Anrollen von kleinen Augen, durch deren Bohrung eine Schraube gesteckt und damit eine Federklammer befestigt wurde. Dem Ideenreichtum der Konstrukteure waren hier keine Grenzen gesetzt und es ist reizvoll, die zahlreichen Lösungen zu analysieren.

Ein besonders wichtiger Fertigungsschritt ist das Augenrollen des 1. Federblattes. In der Literaturstelle [4.74] wird schematisch die Methode des Augenformens auf der Fairbank-Brearley-Maschine (**Bild 4.19**) dargestellt, die in weniger als zwei Sekunden das Federauge herstellt. In Deutschland hat es hauptsächlich drei unterschiedliche Augenformen gegeben, die als Normalauge, Berliner Auge und Leylandauge bezeichnet worden sind (**Bild 4.20**). In der Anfangszeit des Automobils existierte neben diesen mit einem Spalt versehenen Augenformen auch ein lang angespitztes Ende, welches zu einem geschlossenen Auge von etwa  $1 \frac{1}{4}$  Augenumfang führte und somit erst in der 9-Uhr-Position auslief. Für schwere Federn kamen auch geschmiedete Augen [4.49] oder am Augenspalt verschweißte Augen vor. Für die meist aufgedickten Parabelfederaugen, deren Aufdickung durch entsprechendes Walzen bis zur Ursprungsdicke des Vormaterials möglich ist, werden kräftige Augenrollanlagen benötigt. Dabei wird das Blattende zunächst etwa  $90^\circ$  um einen Dorn mit entsprechendem Durchmesser gerollt. Anschließend drückt ein Greifer das teilweise schon vorhandene Auge gegen den Dorn und beide drehen sich soweit, bis das Auge seine vollständige Form erreicht hat [4.86].

Mit der Einführung von Parabelfedern wurden Maschinen nötig, die die lange Auswalzung von oft mehr als 1 Meter ermöglichten. Für die ersten Auswalzungen wurden die sogenannten Pufferfederwalzen eingesetzt. Dann folgten speziell für diese Auswalzungen konzipierte Parabelwalzen. Der Woodhead-Typ arbeitete mit hydraulischer Zustellung der Arbeitswalzen in Abhängigkeit von der verfahrenen Länge. Gesteuert wurde die Hydraulik durch ein schmales Lineal, das die Kontur der Auswalzung aufwies. Nachteilig wurde bei dieser Walzanlage der Umstand empfunden, dass bei zu starker Walzbeanspruchung die Hydraulik nicht unbedingt der Linealvorgabe schnell genug folgte und somit Dickenabweichungen entstehen konnten.

Walzanlagen mit angetriebenen Walzen führten bei den meist benötigten vier oder fünf Stichen zur Breitung des Materials in der Nähe der Augen oder Blattenden und mussten durch Nachbehandlung beseitigt werden, wobei die natürliche Schmalseite verloren ging. Hier schafften die von

Luhn und Pulvermacher eingesetzten Parabelwalzen Abhilfe: Die erwärmte Blatthälfte wurde am späteren Mittelteil in einem vor der Walze angeordneten Rahmen festgespannt. Der bewegliche Rahmen führte die Blatthälfte zwischen die mit ca. 120 mm Durchmesser relativ kleinen Arbeitswalzen, um beim Rückhub den 1. Walzstich auszuführen. Dabei wurde das Blatt vom Rahmen quasi durch die Walzen gezogen. Dieser Zug und die kleinen Walzendurchmesser ergaben gewalzte Blätter ohne Breitung und mit natürlicher Schmalseite.

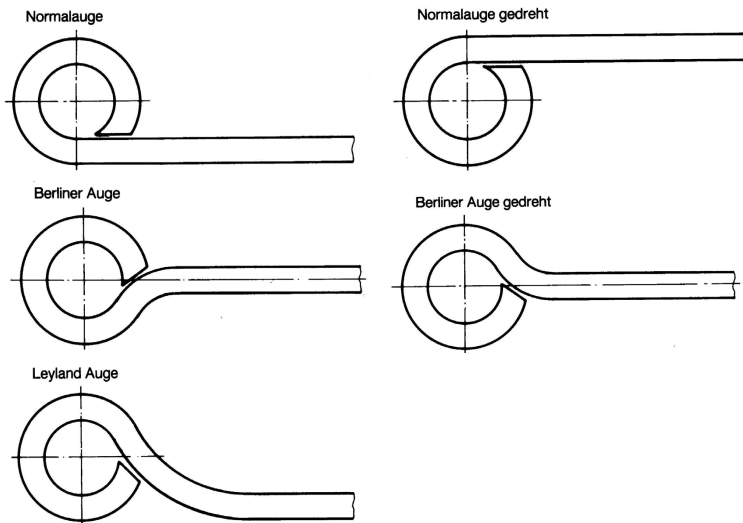


**Bild 4.19:** Schematische Darstellung des Augenformens

Die Zustellung der Arbeitswalzen geschah bei diesem Typ zwangsweise, weil links und rechts im Rahmen vergütete (kalte) Lineale aus üblichem Federstahl – also relativ großer Breite – angeordnet waren, die die Dickenkontur enthielten. Auf diesen Linealen liefen Walzen entsprechender Breite, die mit Überdruck auf die Führunglineale gedrückt wurden. Mit jedem Stich folgten diese Walzen immer weiter dem Verlauf der Lineale und lieferten nach dem letzten Glättstich das konturmäßig korrekte halbe Feder-

blatt. In einem zweiten Durchgang wurde dann die zweite Seite des Blattes hergestellt, die bei abweichender Länge und Kontur (z. B. bei unsymmetrischen Federn) mit anderen Walzlinealen erzielt wurde. Schmalere Federblätter konnten nebeneinander im Duo gewalzt werden.

Neben den horizontal angeordneten Walzen gab es auch Ausführungen mit vertikaler Walzanordnung (**Bild 4.21**). Meist wurden der Parabelwalze eine Hochkant-Richtanlage und Pressen zum Endenschnitt, zum Einbringen von Bohrungen und zum evtl. Abkröpfen nachgeschaltet, um mit einer Erwärmung diese Fertigungsoperationen auszuführen.

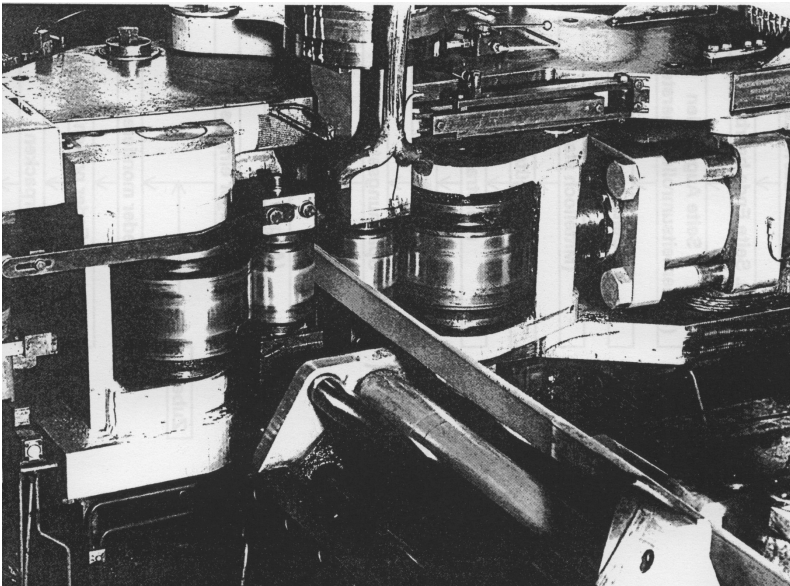


**Bild 4.20:** Augenformen von Blattfedern [4.35]

#### 4.2.1.2 Schraubenfedernvorfertigung

Die Vorfertigung für *Schraubenfedern* umfasst die Stabvorbereitung. Das für die kleineren Drahtdurchmesser bis über 20 mm in Ringen von 1 t (**Bild 4.22**) und für die größeren Durchmesser in Stäben angelieferte Material mit Walzhaut-Oberfläche, das sogenannte „Schwarzmaterial“, wird meist mechanisch bearbeitet, um die Nachteile der Walzhaut zu reduzieren oder zu beseitigen. Im ersteren Fall wurde das Material gezogen, um die Rundheit zu verbessern. Im anderen – viel wichtigeren Fall – wurde die entkohlte

Oberflächenschicht mechanisch abgearbeitet. Hierzu wurde entweder der Fertigungsweg Ziehen vom Ring mit Stablängenschnitt und anschließendem Spitzenlosschleifen oder das Schälen angewendet. Die Schälmachines wurden auch mit während des Betriebes zustellbaren Schälköpfen versehen, so dass neben Stäben mit konstantem Drahtdurchmesser auch Stäbe mit inkonstantem Drahtdurchmesser für die Superprogressiv-, Trichter- und Tonnenfedern hergestellt werden konnten. Ein weiterer Vorteil dieser Schälanlagen war, dass neben der Einzelstabherstellung durch Scheren nach dem Passieren des Schälkopfes durch Weglassen des Scherschnittes – jedoch Anbringen einer Druckmarkierung in der Schervorrichtung – inkonstante Stäbe aneinanderhängend wieder aufgehaspelt werden konnten, um eine kalt-weich Formgebung zu Tonnenfedern in Kaltwindeautomaten vornehmen zu können. Anschließend wurden diese Federn stückvergütet.



**Bild 4.21:** Herstellung des parabolischen Blattdickenverlaufs [4.86]



**Bild 4.22:** Drahtcoils, Vormaterial für Schraubendruckfedern [4.35]

Für die Warmformgebung von Schraubenfedern mit Stäben inkonstanten Durchmessers wurde entweder der Stab aus zylindrisch geschliffenen Stäben auf Langkopier-Dehbänken konisch gedreht oder – ohne Materialverlust – auf Hämmermaschinen konisch kaltgehämmt. All diese Maschinen waren zu dem besonderen Zweck selbst angepasste und mit speziellen Vorrichtungen versehene Einrichtungen. So wurden die Hämmermaschinen abgeleitet aus österreichischen Produkten, die zur Herstellung von Gewehrläufen entwickelt wurden.

Die schweren Schraubenfedern mit Drahtdurchmessern von über 20 mm bis 80 mm und mehr für Schienenfahrzeuge, geländegängige Kraftfahrzeuge und den allgemeinen Maschinenbau (z. B. Fundamentfedern) erhielten während der Stabvorfertigung auch die Anspitzungen an den Enden, um bei ebenen Federauflagen mit einem später an der vergüteten Feder angebrachten Egalisierschliff geringer Materialabnahme einen einwandfreien Stand zu erzielen. Das Anspitzen geschah anfangs durch Ausschmieden zu dem später das Auswalzen hinzukam. Man konnte nur staunen, mit welcher Präzision die Maße der keilförmigen Anspitzung von den Fabriksschmieden eingehalten wurden.

### 4.2.1.3 Drehstabfedern- und Stabilisatorenvorfertigung

In der Vorfertigung von *Drehstabfedern* aus Rundmaterial und von *Stabilisatoren* wurden auf Schmiedemaschinen die Köpfe bzw. Augen angeschmiedet, die Augen durchgelocht und der Schmiedegrad abgeschnitten. Einstückige Drehstäbe für beide Räder einer Fahrzeugachse erhielten neben den Anstauchungen an den Enden auch eine mittige, sechseckige Aufdickung, durch die die Funktion beider Teilstücke technisch getrennt wurde.

Die Köpfe der Drehstäbe wurden nach dem Schmieden auf Maß gedreht oder eckig gefräst, je nachdem, ob Verzahnungen oder Vier- bzw. Sechskantköpfe konstruktiv vorgesehen waren. Von den Verzahnungen mit unterschiedlichen Eingriffswinkeln hatten sich für PKW-Drehstäbe die mit 90°-Eingriffswinkel hergestellten Zähne weit verbreitet, da diese Zahnform sich durch Kaltrollen des Materials vor der Vergütung herstellen lässt.

## 4.2.2 Formgebung und Vergütung

### 4.2.2.1 Blattfedern

Während in der Vorfertigung beim Einsatz von Erwärmungen das spätere Produkt fast immer nur teilweise erhitzt wurde, erhalten die Federblätter bzw. das einstückige Vorprodukt der anderen Federarten eine erste Kompletterwärmung von etwa 900 °C bis 950 °C zur Austenitisierung des Materials. Nach genügender Durchwärmung erfolgt die Formgebung mit anschließendem Abschrecken in Härteöl oder Wasser.

Im Laufe der Geschichte wurden die verschiedensten Brennstoffe wie Kohlen, Öle, Stadt- und Erdgas verwendet und auch die elektrische Energie eingesetzt. In Deutschland dominierten schon vor dem 2. Weltkrieg die gasbeheizten Öfen, während die Neueinrichtung des Federnwerks von Richard Berry & Son [4.74] in West Bromwich/England im Jahre 1953 mit ölbeheizten Öfen zum Austenitisieren und Anlassen erfolgte.

Bei der sogenannten Handhärtung von Blattfedern wurde jedes Federblatt im erwärmten Zustand auf ein bei der Federentwicklung angefertigtes, kaltes Konturblatt mit korrekter Sprengung gelegt und von den Arbeitern mit entsprechenden Zangen an das Konturblatt herangebogen. Anschließend wurde das gebogene Blatt in zwei Haken eingehängt, die der Federnwerker in den Händen hielt und mitsamt dem heißen Blatt in das Wasser- oder Ölbecken abtauchte und darin zur besseren Umspülung mit dem Härtemedium eine zeitlang horizontal und vertikal bewegte.

Die Maschinenhärtung im Blattfedernbetrieb wurde in Deutschland Ende der 1920er Jahre zunächst mit den Trommelmaschinen (**Bild 4.23**) eingeführt. Diese Maschinen enthielten auf einer Trommel mehrere einstellbare Formsegmente, die als Quetten bezeichnet werden und aus zahlreichen verstellbaren Fingern aufgebaut sind. Die Trommel lief mit ihrer unteren Hälfte in einem mit Härtemedium gefüllten Behälter.



**Bild 4.23:** Ausbiegen und Härten eines Federblattes in einer Trommelmaschine

Die aus Ober- und Unterteil bestehenden Quettensegmente wurden mit kalten und zur Kennzeichnung meist rot-lackierten Musterblättern vor der Fertigung eines Loses eingestellt. Mit einer Zange fasste der Federnwerker in der anschließenden Produktion das rotglühende Blatt und legte es mittenzentriert in die geöffnete Quette, die sich vorn oberhalb des Härtebades befand. Über ein Pedal wurde das Schließen der Quette ausgelöst und die Quette sofort anschließend durch Drehen der Trommel ins Bad abgetaucht. Die nachfolgende Quette – meist sechs bis zehn auf einer Trommel – stand nun im geöffneten Zustand zur Aufnahme des nächsten Federblattes bereit. Nachdem sich einige Takte dieses Vorgangs wiederholt hatten, tauchte das erste Federblatt auf der Rückseite dieser Trommelmaschine, noch gehalten von der geschlossenen Quette, wieder auf und wurde nach Öffnen der Quette herausgenommen bzw. ausgeworfen und dem Anlassofen zugeführt.

Neben den Trommelmaschinen existierten die Rahmenmaschinen (**Bild 4.24**), deren Quetten in rechteckigen Rahmengestellen befestigt waren. Nach dem wie bei den Trommelmaschinen beschriebenen Formgebungsvorgang tauchte der komplette Rahmen in das Härtebad ab und wurde im Bad zum rückwärtigen Teil transportiert, um hier aufzutauchen und das Blatt freizugeben. In beiden Härtemaschinen wurden üblicherweise „Lagenbilder“ gehärtet, d.h. die einzelnen Quetten wurden auf die einzelnen Federblätter einer Federtypen eingestellt.

In den ersten Rahmenmaschinen waren die einzelnen Rahmen noch mit Transportketten untereinander verbunden und somit auf Abstand gehalten. Später verzichtete man auf diesen Kettentransport und führte die Rahmen individuell. Vorteilhaft war nun, dass überzählige Rahmen oder gar eine zweite Rahmengruppe seitlich des Härtebeckens herausgefahren werden konnten, so dass die Quetten ohne Fertigungsunterbrechung für nachfolgende Federtypen vorbereitet und eingestellt werden konnten.

In den 1980er Jahren setzte sich für Parabelfedern das freie Härten ohne mitabtauchende Quetten in der kontinuierlichen Produktionslinie durch. Mit der nun horizontal vor dem Härtebecken installierten Einzelquette wird das Federblatt geformt (**Bild 4.25**), ein Greifer transportiert das in der Quette wieder freigegebene Blatt über das Härtebecken, wo es frei abgelegt wird und abtaucht. Meist befindet sich eine 2. Quette seitlich der Produktionslinie in Vorbereitung, um die Rüstzeiten so kurz wie möglich zu halten.

Das nach der Ölhärtung an den Federlagen anhaftende Öl wurde noch bis weit in die 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts einfach im Anlassofen abgebrannt, bis dann aus Umweltschutzgründen ein Waschvorgang zwischen Härtebad und Anlassofen zwischengeschaltet wurde. Luftaufnahmen von Federnwerken zeigten an den verschmutzten Dächern genau an, wo im Betrieb Härtemaschinen und Anlassöfen platziert waren.



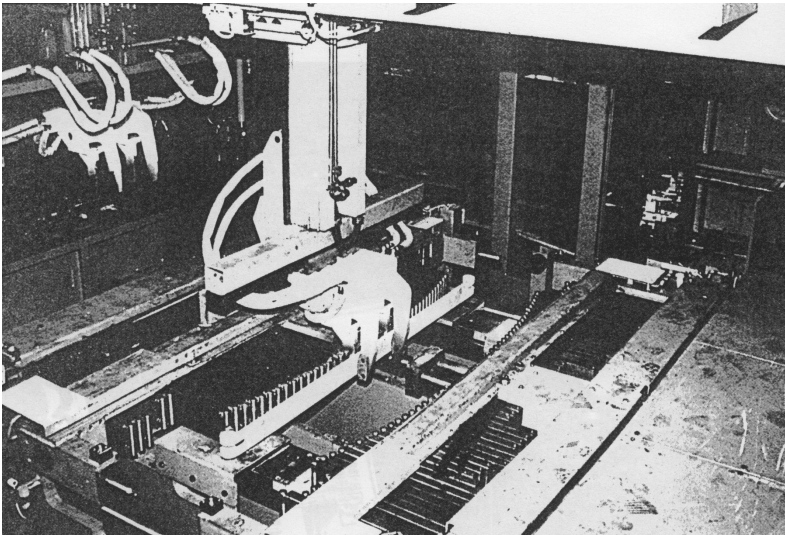


**Bild 4.24:** Ausbiegen und Härten eines Federblattes in einer Rahmenmaschine [4.36]

Das nach der Ölhärtung an den Federlagen anhaftende Öl wurde noch bis weit in die 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts einfach im Anlassofen abgebrannt, bis dann aus Umweltschutzgründen ein Waschwagen zwischen Härtebad und Anlassofen zwischengeschaltet wurde. Luftaufnahmen von Federnwerken zeigten an den verschmutzten Dächern genau an, wo im Betrieb Härtemaschinen und Anlassöfen platziert waren.

Die anfangs verwendeten Kammeröfen wurden mit der zunehmenden Motorisierung nach dem zweiten Weltkrieg allmählich durch Durchlauföfen mit Platten- oder Prismenbändern ersetzt, um einer kontinuierlichen Fertigung näher zu kommen.

Die Temperaturführung der Härte- und Anlassöfen beeinflusste die Güte der Vergütung. So konnte man als junger Federnwerker bei den in den 1970er Jahren noch stattfindenden 40- oder 50jährigen Arbeitsjubiläen nicht recht glauben, wenn die „Alten“ vom sogenannten Weidenrutentest erzählten.



**Bild 4.25:** Ausbiegen eines Federblattes in einer Einzelzette [4.86]

Lange Zeit trug man sich mit dem Gedanken, einem der zahlreichen „Dönkes“ aufgesessen zu sein. Doch es ist folgendes verbürgt [4.2]: Im Winter ging der Lehrling für Technisches Zeichnen bei Dittmann & Neuhaus mit einem alten Federnwerker in die nahen Ruhrwiesen und schnitt von den Kopfweiden die einjährigen Triebe ab. Diese wurden gebündelt und zum Trocknen auf einen Anlassofen gelegt. Diese Ruten wurden dann nach und nach gebraucht, um die Temperatur der Federblätter im Anlassofen zu prüfen. Man strich mit einem Rutenstück über das Federblatt und wenn das Holz zündete, war die Temperatur hoch genug. Andernfalls wurde weiterhin angelassen.

Am Ende der Durchlauf-Anlassöfen wurde das Plattenband über das Ofenende hinaus etwas weiter geführt, um dann über Umlenkräder unter dem Ofen zurück zum Ofeneinlass geführt zu werden. Die Umlenkung benötigte einen Durchmesser von etwa 1,5 Metern und so war es üblich, das anschließende Wasserkühlbecken entsprechend niedriger anzuordnen. Wenn die auf der Umlenkung liegenden Federblätter Übergewicht bekamen, fielen sie meist zu mehreren gleichzeitig nach anfänglichem Rutschen einige Meter tief in das Wasserbecken und ehe sie über das anschließende Schrägtransportband weiterbefördert wurden, konnten auch nachfolgende Teile unkontrolliert hinzukommen und Beschädigungen verursachen. Dieses Übel wurde erst mit dem Einsatz von Wasserbrausen anstelle der Wasserbecken beseitigt.

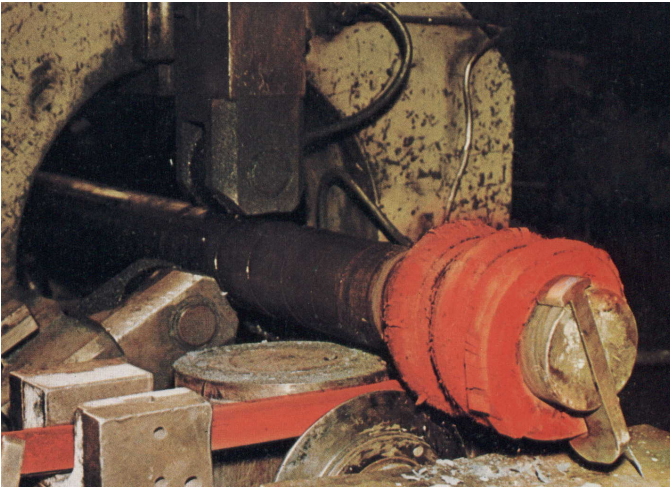
#### 4.2.2.2 Schraubenfedern

Vor Einführung von kontinuierlichen Fertigungsstraßen für *Schraubenfedern* in Deutschland etwa ab 1960 wurden die vorbereiteten Stäbe in einer überschaubaren Stückzahl in dem sogenannten Wickelofen auf Wickeltemperatur, die etwa der Austenitisierungstemperatur entsprach, gebracht und dann einzeln nacheinander aus dem Ofen gezogen. Dazu griff der Wickler den Stabanfang mit einer Zange und führte den Stab durch eine kurze, u-förmige Führung dem Vorderende eines etwa 2,5 m langen Wickeldorns zu. Am Kopf des Dorns wurde der Stabanfang durch einen Mitnehmer befestigt (**Bild 4.26**). Dann rückte der Federwickler an einem Handhebel die Kuppelung der Wickelbank ein und indem sich nun der Dorn drehte, wurde der Stab auf dem Dorn aufgewickelt. Die Wickelsteigung erzielte man durch einen Dornvorschub, während die feststehende Führung den Zulauf des Stabes kontrollierte.

Für die steigungslosen, etwa 270° umfassenden Teile von Federanfang und Federende war ein Freilauf vorhanden, der durch Mitnehmer an der richtigen Stelle des Wickelvorgangs aus- bzw. eingeschaltet wurde. Wenn das äußerste Ende des Stabes die Führung verlassen hatte, war die Formgebung des Wickelns beendet, obwohl das Reststück des Stabes noch tangential vom Dorn abstand. Nun griff der Wickler zum Handhammer und schlug mit einigen gezielten Schlägen das Ende an den Dorn an. Zur Kennzeichnung der Feder konnte mit einem Handstempel eine Sachnummer eingeschlagen werden.

Der Abschluss der Formgebung erfolgte mit geschicktem Einsatz der Flachzange, womit insbesondere die Steigung der Endwindungen korrigiert wurde. Der jeweils vorgegebene Abstand zwischen den äußersten Federenden

und der nächsten bzw. vorletzten Windung wurde mit einem Spion kontrolliert. Dann wurde die Feder nach Entfernung des Mitnehmers mit der Handzange vom Dorn gezogen. Hierbei traten nur selten Schwierigkeiten durch zu hohe Reibung mit dem Dorn auf, da mit der Freigabe des Stabendes aus der Führung ein leichtes Aufspringen der Feder auf einen etwas größeren Innendurchmesser als dem Dordurchmesser erfolgte. Eine Kontrolle der Winkligkeit auf einem Steigungsfederteller schloss den Formgebungsvorgang ab. Die Feder wurde zum Abkühlen auf eine Ablage mit Winkeleisen als Prismenersatz gelegt.

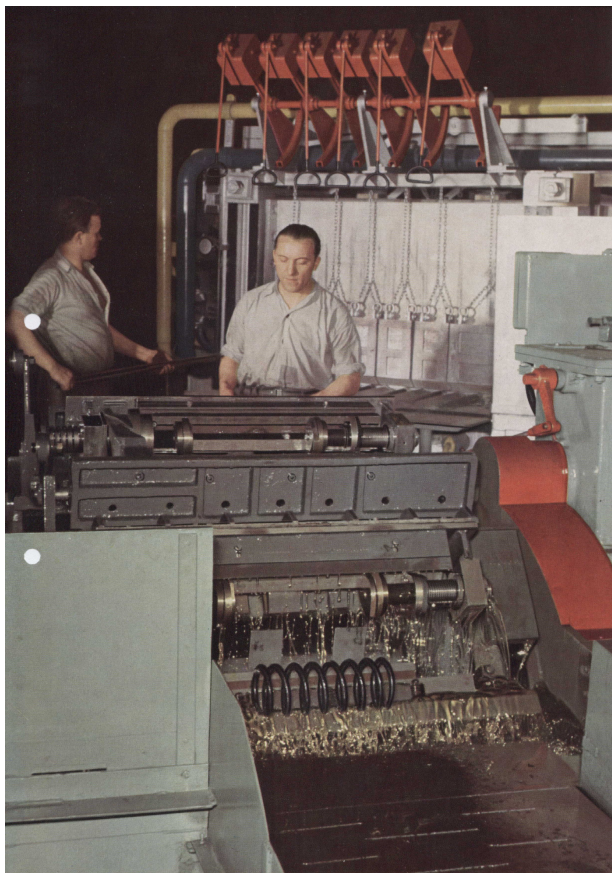


**Bild 4.26:** Wickeln von schweren Schraubendruckfedern

War das Fertigungslos gewickelt, schloss sich oft Tage später die Neuerwärmung im Härteofen an. Damit keine unzulässigen Verformungen der Federn in der Austenitisierungswärme von ca. 900 °C während der Ofenliegezeit erfolgten, lagerten die Federn auf Gussprismen. Mit einer Stange aus dem Ofen gezogen, wurden die leichteren Federn anfangs auf Haken genommen und von Hand ins Härtemedium abgetaucht. Später rollten die Federn in das Härtebecken oder wurden einer Trommelhärtemaschine mit drei Härteleisten in den Quetten zugeführt (**Bild 4.27**). Auf Prismen erfolgte auch die Lagerung der Federn im Anlass-Kammerofen.

Um eine kontinuierliche Fertigung der Schraubenfedern zu erreichen, mussten die Kammeröfen zur Staberwärmung durch Hubbalkenöfen und zum

Härten und Anlassen durch Durchstoß-, Durchlauf- oder Rundöfen ersetzt werden. In allen Fällen musste die Prismenlagerung nach der Formgebung beibehalten werden.



**Bild 4.27:** Blick von der Auswurfseite einer Trommelhärtemaschine zurück auf den Härteofen [4.36]

Im Durchstoßofen lagen die Schraubenfedern nebeneinander in Sechserreihe auf nutgeführten Prismen, die gemeinsam mit den Federn mittels einer Hydraulik taktweise durch den Ofen gestoßen und nach Entnahme der Federn zum Ofeneingang zurücktransportiert wurden.

Obwohl der Wickelofen, als Schnecken- oder Hubbalkenofen ausgebildet, zur Staberwärmung mit der automatischen Wickelbank, z. B. der amerikanischen Firma Gogan, zur kontinuierlichen Produktion mit Dorn und Leitrolle verknüpft worden war, hat man zunächst den anschließenden Rundofen zur Stabilisierung der Austenitisierungstemperatur vor dem Härten in der Trommelhärtemaschine beibehalten (**Bild 4.28**). Erst Ende der 1970er Jahre war auch auf diesen ältesten in Produktion genommenen Fertigungsstraßen die Taktzeit und damit die Durchlaufzeit vom Ausgang Wickelofen bis Abtauchen in der Härtemaschine so kurz geworden, dass man auf den separaten Austenitisierungs-Rundofen verzichten konnte. Die dann schon installierte 2. Generation von Kontistrassen war von vornherein ohne den mittleren Ofen konzipiert worden. Der Durchsatz von PKW-Schraubenfedern war zwischenzeitlich von 200 Stück auf 600 bzw. 720 Stück pro Stunde gesteigert worden, so dass letztlich Taktzeiten von 5 Sekunden erreicht wurden.

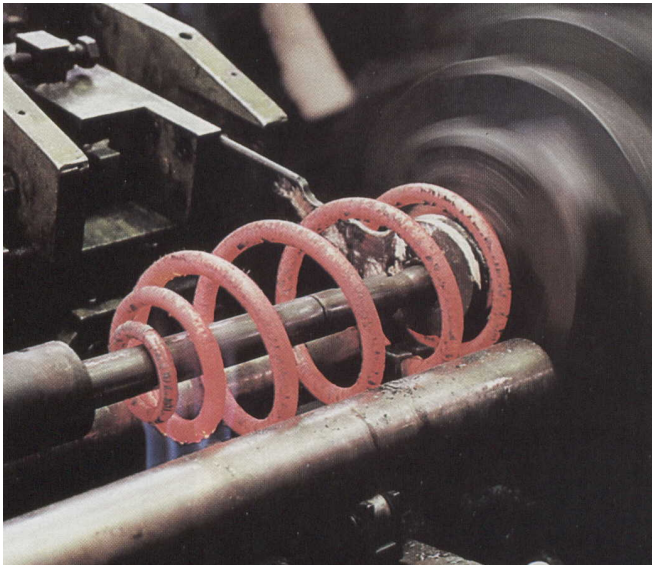


**Bild 4.28:** Ältere kontinuierliche Schraubenfedernfertigungsanlage mit Rundofen [4.37]



Zur Reduzierung der Rüstzeiten trugen schließlich die Kassettewickelbänke bei, mit denen in Japan bei zylindrischen Schraubenfedern Rüstzeiten von nur etwa 10 Minuten erreicht wurden. Jede Kassette umfasste die komplett eingestellten Wickelwerkzeuge, wie Dorn, Leitrolle, Andruckrolle, Vorsatz und Mitnehmer. Mit einer leichten Korrektur der Werkzeuge an den ersten zwei bis drei Probefedern, konnte das Serienlos anlaufen. Und das musste auch geschehen, da der Wickelofen nach einer Lücke für etwa ein Dutzend Stäbe bereits wieder belegt war.

Für kompliziertere Federformen wie die Pigtailfeder mit beidseitig eingewickelten Endwindungen oder gar die Tonnenfeder wurde nach dem Hoesch-Verfahren der Wickelbank ein sogenannter Pigtailer nachgeschaltet, der vor dem Härten die Endwindung oder den hinteren Teil der Tonnenform (**Bild 4.29**) aus dem in der Wickelbank vorgeformten Zylinder einformte. Trotz dieser zusätzlichen Formgebung konnte bei Taktzeiten von 5 bis 6 Sekunden eine Durchlaufzeit zwischen Ausgang Wickelofen und Abtauchen ins Härteöl von etwa 30 Sekunden für ausreichende Härtetemperatur eingehalten werden.



**Bild 4.29:** Einrollen der zweiten Seite einer Tonnenfeder [4.35]

Die Firma Brüninghaus löste das Herstellproblem der Pigtailfeder durch eine nachgeschaltete Presse anstelle des Pigtailers. Mit einem entsprechenden Werkzeug wurde die Endwindung in der Presse auf die geforderte Form gedrückt.

Zur Herstellung der Tonnenfeder nutzte dieser Hersteller zwei hintereinander angeordnete Wickelbänke und wiederum die abschließende Presse. Dabei wurde der im Wickelofen erwärmte doppelkonische Stab in der ersten Wickelbank knapp zur Hälfte zur Feder gewickelt. Noch bei geschlossenem Dorn griff ein zwischen erster und zweiter Wickelbank angeordneter Roboter die Feder am bereits gewickelten Teil und zog nach Öffnen des Dorns die Teilfeder mit dem hinteren Stabteil aus der ersten Wickelbank und führte das Stabende in den Mitnehmer der zweiten Wickelbank ein. Nach der positionsgerechten Öffnung der Roboterhand wurde der hintere Stabteil bis auf ein kurzes Reststück gewickelt. Zu diesem Zeitpunkt hatten die beiden Teilfedern einen parallelen Achsversatz. Mit einem Manipulator wurde das Zwischenprodukt aus der zweiten Wickelbank herausgenommen und der Presse zugeführt. Hier erfolgte in einem entsprechenden Formwerkzeug das Einklappen beider Teile zur Tonnenform. Anschließend wurde gehärtet.

Die Firma Ahle entwickelte ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Tonnenfedern. Der auf einer Eigenentwicklung ziehgeschälte Stab wurde im kalt-weichen Zustand auf einem bereits tonnenförmigen Dorn zur Federform gewickelt. Um die Feder in diesem Zustand vom Dorn zu bekommen, war dieser aus einzelnen Scheiben auf einer genuteten Zentralwelle zusammengesetzt. Nach Entfernen der Welle fielen die Scheiben zwischen den einzelnen Windungen hindurch und gaben die Feder frei. Da die Formgebung kalt-weich erfolgte, konnten die Dornscheiben aus Kunststoff hergestellt werden. Die Federn wurden anschließend auf Härtetemperatur gebracht und stückvergütet.

Für schwere Tonnenfedern mit geeigneten Steigungsverhältnissen wurde bei Dittmann & Neuhaus ein Schneckendorn verwendet. Bei diesem Dorn blieb nur ein schmaler Wickelsteg in der Lauflinie des Federstabes stehen, während alle übrigen Teile bis auf einen zentralen Kern mit einem Durchmesser kleiner als der kleinste Wickelinnendurchmesser am Federende herausgearbeitet wurden. Nach der Warmwicklung wurde die Feder axial so weit verschoben, dass sie über die abgearbeiteten Dornanteile vom Dorn herausgedreht werden konnte.

Zur Herstellung von Schraubenfedern im Abmessungsbereich für PKW-Tragfedern werden alternativ auch Kaltwindeautomaten angewendet. Mit ersten Kaltwindeautomaten wurden in den 1960er Jahren bei Dittmann & Neuhaus Bremsspeicherfedern bis 16 mm Drahtdurchmesser aus vorvergü-



tetem Draht mit etwa  $1.600 \text{ N/mm}^2$  Vergütedefestigkeit erfolgreich hergestellt. In den 1970er Jahren wurden diese Kaltwindeautomaten auch benutzt, um die ersten Tonnenfedern aus auf kugeligen Zementit weichgeglühtem und mit inkonstantem Drahtdurchmesser versehenem Material herzustellen (**Bild 4.30**) und anschließend stückzuvergüten.

Zur Verbesserung der Entkohlung insbesondere der seit etwa 1990 wieder eingeführten Siliziumfederstähle haben sich letztlich induktive Erwärmungsanlagen durchgesetzt. Während die Ofenreise in einem erdgasbeheizten Hubbalkenofen für PKW-Schraubenfedern etwa 15 Minuten beträgt, wird die Induktionserwärmung in wenigen Sekunden erreicht. Der Transport bis zur Wickelbank reicht aus, um in dieser Zeit eine homogene Austenitisierung zu erzielen, ohne dass Entkohlungen an der Oberfläche merkbar werden.



**Bild 4.30:** Kaltwinden einer Tonnenfeder [4.35]

### 4.2.2.3 Drehstabfedern und Stabilisatoren

Während *Drehstabfedern* am Ende der Vorfertigung bereits ihre endgültige Form aufweisen und vergütet werden, müssen die *Stabilisatoren* oft in z.T. schwierige Formen gebogen werden, ehe der Härtevorgang stattfindet.

Mit der Einführung von Stabilisatoren in den 1930er Jahren wurden die Biegungen dieser Bauteile zunächst durch gezieltes Erwärmen einer vorgesehenen Biegestelle nacheinander ausgeführt. Meist arbeiteten zwei Werker gemeinsam. Einer erwärmte die Stelle mit einem Schweißbrenner und der andere zog oft mit Unterstützung durch einen längeren, rohrförmigen Hebel das Teilstück um ein entsprechendes Formstück herum. Die Formgebung begann an den innersten Biegungen jeder Seite abwechselnd. Dabei steckten die einfachen Formstücke in einer horizontal liegenden Stahlplatte mit entsprechenden Aufnahmebohrungen für die Formstückstifte. Die horizontale Stahlplatte, die sich etwa in Bauchhöhe der Werker befand, ergab schließlich den Begriff „Biegetisch“.

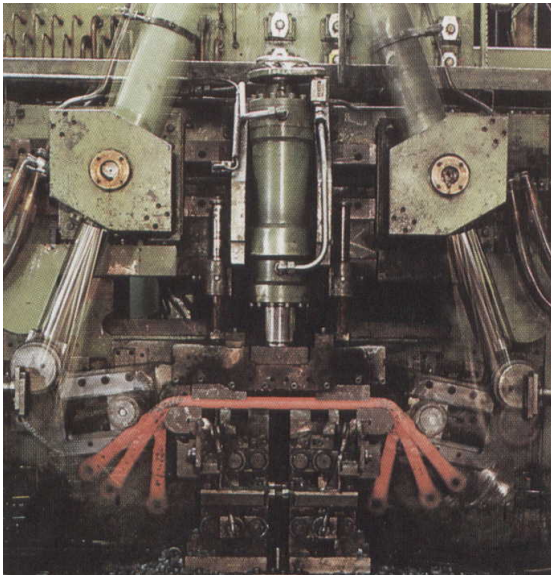
Nachdem es auch in der Stabilisatorenfertigung zu kontinuierlichen Linien gekommen war, wurden diese Biegetische unter Beibehaltung des Begriffs meist senkrecht gestellt und waren mit zahlreichen Hydraulik-Zylindern für die Biegewerkzeuge versehen. PKW-Stabilisatoren bis etwa 30 mm Durchmesser erhielten je einen separaten Biegetisch, während die kleineren Lose von LKW-Stabilisatoren, die zwischen 35 mm und 80 mm Stabdurchmesser aufwiesen, in einem gemeinsamen Biegetisch mit individuell bestückbaren Werkzeugen gebogen wurden (**Bild 4.31**). Für PKW-Stabilisatoren genügte zur korrekten Positionierung der Enden die gute Fixierung im Biegetisch, während für die kräftigen Augen schwerer LKW-Stabilisatoren nach der Entnahme aus dem Biegetisch vor dem Abtauchen ins Härtöl eine Richtoperation eingeschoben wurde. Dünne PKW-Stabilisatoren aus vorvergütetem Material wurden auch kalt gebogen.

### 4.2.3 Nachbehandlungen

Nach der Vergütung folgen Arbeitsschritte zur Leistungssteigerung der Produkte und bei mehrteiligen Federelementen die Montage. Zur unmittelbaren Leistungssteigerung gehören heute die zahlreichen Verfahren des Kugelstrahlens und das betriebliche Vorsetzen sowie mittelbar auch der Korrosionsschutz.

Einen Überblick über das Kugelstrahlen von seinen Anfängen findet man beispielsweise in den Veröffentlichungen von *Gesell* [[4.26] und *Kloos* /

*Macherauch* [4.53]. Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts erkannte man, dass Werkstücke durch Putzen oder Scheuern auch eine Festigkeitssteigerung erfuhren. In Amerika wurde das Kugelstrahlen erstmals 1929 auf Federn angewendet [4.109]. Erst 1938 folgte man in Deutschland.



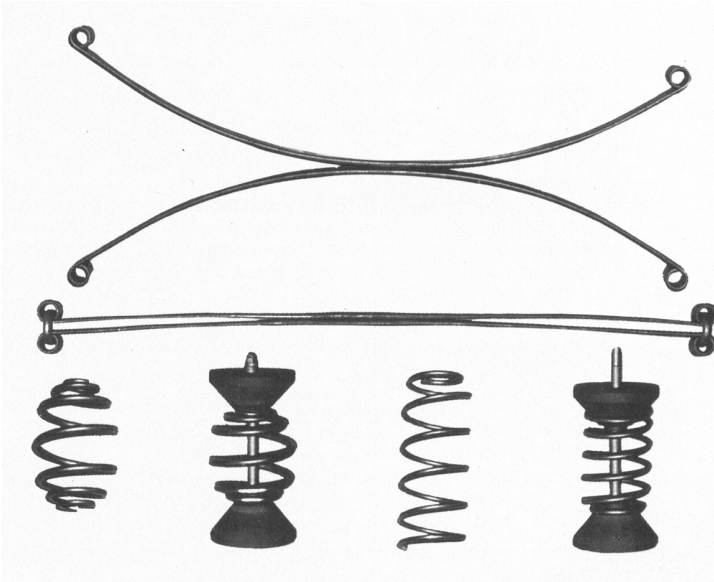
**Bild 4.31:** Schwerer Biegetisch für LKW-Stabilisatoren [4.35]

#### 4.2.3.1 Blattfedern

Für geschichtete *Blattfedern* wurde das Kugelstrahlen zum Entzundern der Oberflächen benutzt. Erst an den ohne gegenseitige Berührung und damit freiliegenden parabelförmig ausgewalzten Teilen von Parabelfedern oder an geschichteten Blattfedern mit Kunststoffzwischenlagen über die gesamten Blattlängen konnte sich der Strahleneffekt mit den in die Oberflächenschicht eingebrachten Eigenspannungen lebensdauersteigernd voll auswirken.

Man erkannte [4.87] die weitere Lebensdauersteigerung durch Spannungsstrahlen. Dieses wurde oft bis in die 1980er Jahre als sogenanntes Streckverdichten durchgeführt. Hierbei wurden zwei gleiche Federblätter – mit den Druckseiten gegeneinander liegend – etwa in Strecklage durch u-för-

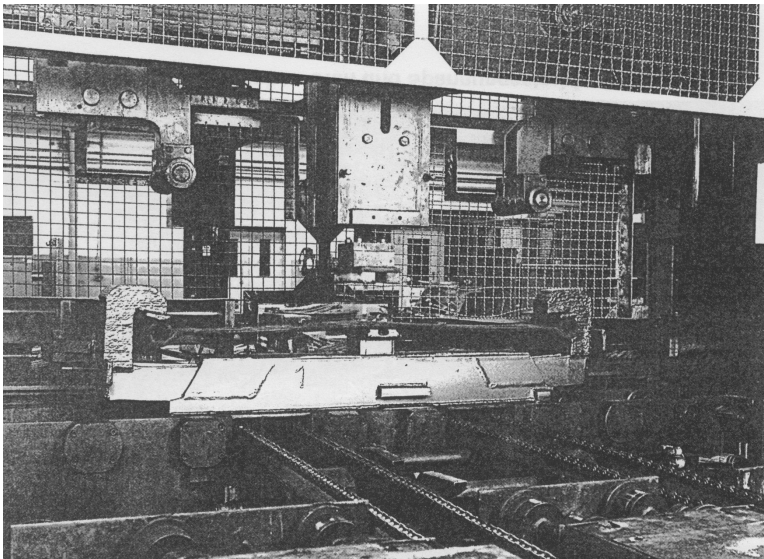
mige Klammern in den Augen oder in der Nähe der Enden verspannt (**Bild 4.32**) und so zweimal mit dazwischen vorgenommenem Wenden durch den Kugelstrahler geschickt. Eine Verbesserung brachte dann das „Überstreckverdichten“ mit einem Distanzklotz im Mittelbereich. Im gestreckten Zustand wurden die Federblätter etwa mit der statischen Volllastspannung von etwa 600 bis 700 N/mm<sup>2</sup> und im überstreckten Zustand mit der Anschlagspannung von etwa 1.000 bis 1.100 N/mm<sup>2</sup> vorgespannt. Leider wurde bei diesen beiden Spannvarianten das beim ersten Durchgang durch den Strahler gestrahlte Federblatt besser gestrahlt, da dieses während des Strahlens sich naturgemäß setzte und somit die Vorspannung des Zwillingenblattes vor dem zweiten Durchgang reduzierte. Immerhin war die Verwendung der bisherigen Strahler ein Vorteil, da keine Neuinvestitionen notwendig waren und man den vorhandenen Strahler für Parabelfedern als auch konventionelle Federblätter nutzen konnte.



**Bild 4.32:** Ursprüngliche Methoden des Spanns zum Spannungsstrahlen [4.35]

Mit der Zunahme von Parabelfedern und dem Rückgang der Trapezfedern kamen in den Neuinvestitionen auch die auf die Parabelblätter angepassten Spannungsstrahler auf, die mit Spann- und Entspannstationen vor bzw. nach dem Strahler sowie dem Transport der gespannten Federblätter in besonderen Spannkassetten (**Bild 4.33**) ein Optimum an Lebensdauergewinn brachten, insbesondere da in den 1990er Jahren die Vorspannung bis etwa  $1.600 \text{ N/mm}^2$  gesteigert wurde.

Aber auch diese Leistungsgrenze konnte nochmals überboten werden durch die Dreierkombination Vorstrahlen, Erwärmen und Spannungsstrahlen (**Bild 4.34**) nach dem Krupp Hoesch –TMRV – [4.103] bzw. dem Styria – Tec2 – Verfahren [4.86]. Durch diese Fertigungsfolge wird in der Randschicht eine künstliche Reckalterung mit dauerhafter Einlagerung von Kohlenstoffatomen in die aufgeweiteten Bereich von Versetzungen erreicht, wodurch in der Randschicht die Elastizitätsgrenze und Festigkeit erhöht werden.



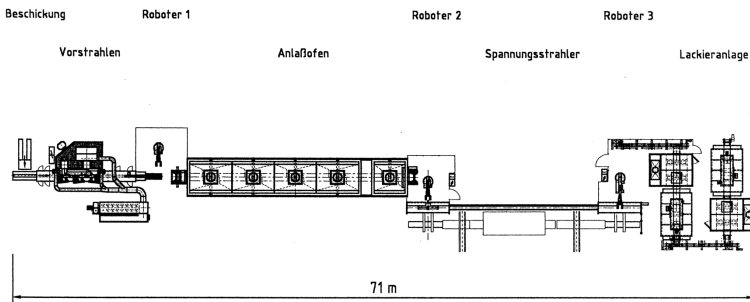
**Bild 4.33:** Spannkassette mit gespannten Federblättern [4.86]

Nach diesem sehr wichtigen Kugelstrahlen folgen für Parabelfedern das Einzelblattlackieren, das mechanische Innenbearbeiten der Augen, die evtl. Bearbeitung der Augenbreite, das Einpressen von Messing- oder Gummi-

buchsen und die Zuführung des Zubehörs, wie Federschrauben, Federklammern, Distanzröhrchen, Schrauben für Federklammern, Muttern, Zwischenlagen aus Stahl, Kunststoff und Gummi-Metall-Verbindungen sowie Niete.

Für Trapezfedern sei noch zusätzlich auf das Fetten der Einzellagen hingewiesen, bevor sowohl diese als auch die mehrlagigen Parabelfedern montiert, gesetzt, geprüft und nach einer Endlackierung – bei Parabelfedern bisher Zinkstaubfarbe und bei konventionellen Blattfedern ein Klarlack – auf Paletten geschichtet dem Versandlager zugeführt werden.

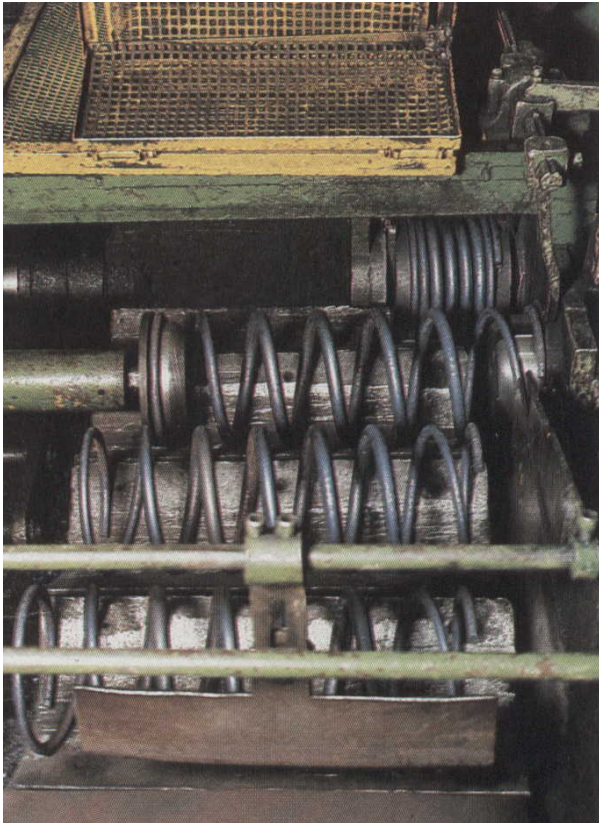
Das betriebliche Vorsetzen der Blattfedern, und hier insbesondere der Parabelfedern, stellt neben der Einstellung der verlangten Bauhöhe insofern eine Leistungssteigerung dar, weil dadurch die Streckgrenze des Materials bis zur zweifachen Fließdehngrenze überschritten wird. Dies führt zu Eigenspannungen im gesamten Querschnitt, die sich in einer rechnerischen Randspannung von 30 % bis 40 % über der Streckgrenze bemerkbar machen. Rechnerisch werden beim Setzvorgang Spannungen bis zu  $2.200 \text{ N/mm}^2$  erreicht, so dass bis zu dieser Spannung die Feder setzfest ist und die gefürchteten S-Schlag-Verformungen beim Beschleunigen und Bremsen verhindert werden.



**Bild 4.34:** Schematische Gesamtansicht einer modernen Oberflächenverfestigungsanlage [4.86]

#### 4.2.3.2 Schraubenfedern

Die *Schraubenfeder* – wenn man von aufgezogenen Schläuchen auf Superprogressivfedern einmal absieht – als einstückiges Federelement wird vorzugsweise heute direkt nach dem Anlassen gesetzt, um die Anlasswärme zum sogenannten Warmsetzen zu nutzen (**Bild 4.35**).



**Bild 4.35:** Warmsetzen von Schraubenfedern [4.35]

Man darf davon ausgehen, dass in früheren Zeiten die Schraubenfeder wie auch die anderen Federelemente gar nicht betrieblich gesetzt wurden. Jedoch führte die Setzanfälligkeit solcher Federn während ihres Einsatzes zu

Überlegungen, diese Feder höher zu wickeln, um durch Kaltsetzen nach der Vergütung die Setzanfälligkeit zu verringern. Unglücklicherweise blockiert sich die Schraubenfeder selbst und so wird es manchmal schwierig gewesen sein, auch bei mehrmaligem Kaltsetzen immer genau die verlangte Bauhöhe der Feder zu erreichen. Führte man aus diesem Grund die Wickelhöhe tendenzmäßig immer etwas niedriger aus, musste man beim Kaltsetzen entweder die drei oder fünf vorgeschriebenen Setzvorgänge reduzieren oder gar den Setzvorgang vor der Blockposition beenden.

Das wird der Beginn des Warmsetzens gewesen sein, weil mit zunehmender Temperatur die betrieblichen Vorsetzeträge zunehmen. Man wurde unabhängig von den unterschiedlichen mechanischen Werten des Vormaterials und den eigenen Fertigungsschwankungen innerhalb der verlangten Toleranzgrenzen, wenn das Fertigungslos über die Setztemperatur gesteuert werden konnte.

Für PKW-Achsschraubenfedern wurden die meist vier Federn einer Prismenreihe nach Verlassen des Anlassofens in einem auf 80 °C gehaltenen Wasserbad abgekühlt und erst dann der Setzpresse zugeführt. Durch Steuerung der Tauchzeit konnte die individuelle Federtemperatur eines Loses eingestellt und bei Bedarf auch innerhalb des Loses korrigiert werden. Als längste Tauchzeit ergab sich ungefähr die Federanzahl einer Prismenreihe multipliziert mit der Taktzeit; also bei den ersten Kontistrassen mit beispielsweise 240 Federn pro Stunde eine Tauchzeit von maximal 1 Minute, die zur Abkühlung auf die Wasserbadtemperatur von 80 °C ausreichend war. Wenn diese Temperatur zu niedrig war, um die Bauhöhe zu erreichen, verkürzte man die Tauchzeit. In Arbeitsblättern konnte man später Tauchzeiten von einigen Zehntelsekunden vermerkt finden, bis man das Wasserbad ganz abschaltete und „aus der Anlasswärme“ mit mehr oder weniger Luftkühlung mittels Gebläse zur Setztemperatur gelangte. Dies war der Stand in den 1980er Jahren.

Schließlich setzten sich jedoch immer mehr die Anlassöfen mit abschließendem Kühl- und Warmsetztemperaturbereich durch, mit denen die Temperaturführung wesentlich verbessert werden konnte.

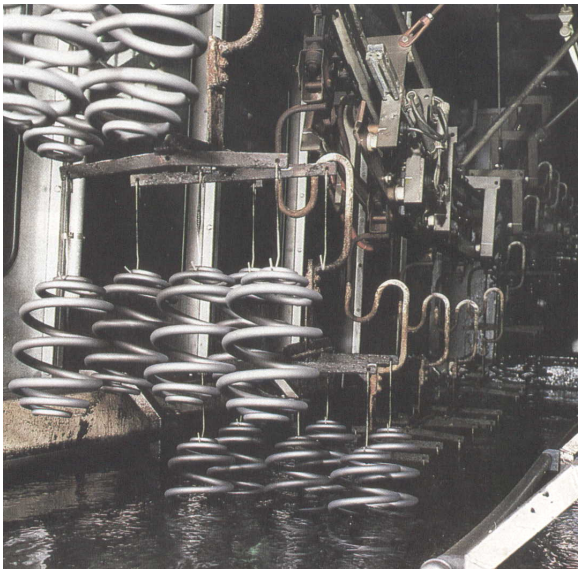
Eine historische Vorrichtung zum Setzen von Federn soll nicht unerwähnt bleiben. Die schweren Schraubenfedern aus dem 3 %-Siliziumfederstahl mussten im Hoesch-Federnwerk während des 2. Weltkriegs gesetzt werden. Es fehlte jedoch eine Setzpresse geeigneter Leistung. Deshalb wurde an einem senkrecht gestellten langen Träger ein schweres Gewicht geführt und vom Hallenkran in die obere Position gebracht. Eine Feder wurde an den unteren Teil des Trägers gestellt und das Gewicht ausgeklinkt. Das Setzergebnis soll gut gewesen sein [4.1].



Im Anschluss an das Setzen wurden die Schraubenfedern in Durchlaufstrahlern mit mehreren Schleuderrädern kugelgestrahlt, in Transportgehänge der Lackieranlage eingehängt und nach der Vorbehandlung durch Phosphatieren lackiert.

Ursprünglich wurden die Federn noch in den 1970er Jahren durch Tauchen in lösungsmittelhaltigen Lacken beschichtet und bei ca. 80 °C beschleunigt getrocknet. Dann setzten sich aus Umweltschutzgründen die EC-(Electro Coating) Anlagen mit Lackpartikeln in wässriger Lösung und Lackvernetzung im anschließenden Umluftofen bei ca. 160 °C durch (**Bild 4.36**), bevor schließlich die EPS-Pulverbeschichtungen mit nachfolgender Lackvernetzung bei ebenfalls ca. 160 °C Anwendung fanden.

Die Lastprüfung schloss den Herstellprozess ab. An den Vertikalprüfmaschinen kontrollierte der Werker die Last und kennzeichnete durch Pinselstriche mit verschiedenen Farben die Federtypen- und Lastgruppenzugehörigkeit. Dieser Prozess wurde schließlich ebenfalls automatisiert mit horizontalen Setz- und Prüfstrecken mit elektronischer Überwachung und Farbsignierungen aus Farbsprühpistolen oder Tampoprintauftragung, ehe die Federn lastgruppengerecht ausgeschoben und abgepackt wurden.



**Bild 4.36:** Elektrotauchlackierung [4.35]

#### 4.2.3.3 Stabfederelemente

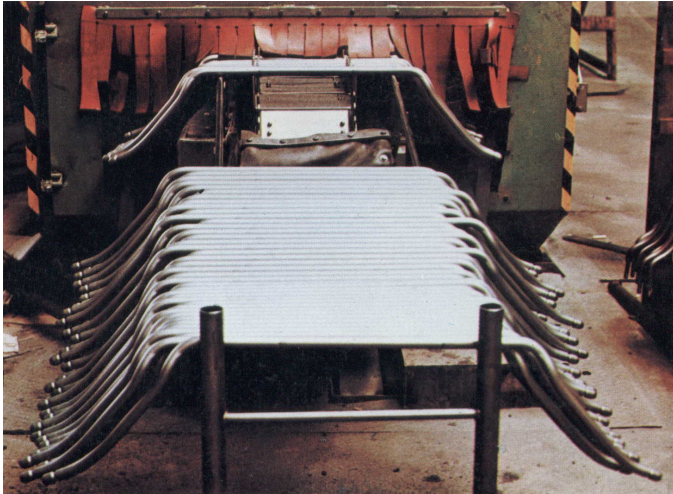
*Stabfederelemente*, also Drehstabfedern und Stabilisatoren, wurden nach der Vergütung ähnlich wie Schraubenfedern behandelt, wobei wegen der ungehinderten Verdrehbarkeit die Drehstäbe kalt gesetzt wurden und bei den wechselseitig beanspruchten Stabilisatoren selbstverständlich das betriebliche Setzen entfiel. Dafür kam bei den Stabfederelementen das Richten auf Geradheit bei Drehstäben und auf Formgenauigkeit bei Stabilisatoren (**Bild 4.37**) hinzu. Die Drehstäbe wurden mit einer Messuhr auf Schlag geprüft und notfalls unter der Presse mit weichen Kunststoffwerkzeugen korrigiert. Für die Stabilisatoren gab es Richtlehren, in die die Teile hineinpassen mussten. Gute Richter wussten genau, wo sie am Stabilisator den Richtdruck in welcher Intensität ansetzen mussten, um schnell zu einem passenden Teil zu kommen.



**Bild 4.37:** Prüfen der Formgenauigkeit eines Stabilisators

Zum Kugelstrahlen von Drehstäben wurden die Köpfe in Scheiben aufgenommen und so durch den Strahler transportiert. Man achtete darauf, dass die Scheibenbreite den inneren Kopfbereich um einige Millimeter frei ließ. So konnte dieser durch die Kerbverzahnung hochbeanspruchte Bereich ebenfalls gestrahlt werden.

Im Stabilisatorenstrahler (**Bild 4.38**) kam es insbesondere auf die Strahlwirkung in den hochbeanspruchten Hauptkümmern zwischen den Schenkeln und dem Rücken an. Beide Federelemente wurden abschließend phosphatiert und EPS-beschichtet.



**Bild 4.38:** Auslaufseite eines Kugelstrahlers für Stabilisatoren

## 4.3 Maschinen und Einrichtungen für die Kaltformgebung

### 4.3.1 Maschinen für die Herstellung von Schraubenfedern

Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts erfolgte das Wickeln eines *Schraubenfederkörpers* auf drehbankähnlichen Wickelbänken bzw. mit Wickelvorrichtungen.

Nach [4.12] präsentierte die Firma Wagner & Ficker erstmals 1912 eine vielseitig verwendbare Druckfedermaschine (s. a. Abschn. 4.1). Die Weiterentwicklung dieser Maschine führte 1928 zu einer Federwindmaschine, die alle bekannten Merkmale einer heutigen Maschine wie Rolleneinzug und Drahrichtapparat, zwei Windefinger, Steigung von unten, vertikaler Schnitt, ausgelöst durch eine Kupplung, aufwies. Der Antrieb erfolgte jedoch durch einen Riemen über eine zentrale Transmission.

Nach dem zweiten Weltkrieg standen genug Elektromotoren zur Verfügung, so dass Druckfederwindmaschinen mit Einzelmotorantrieb möglich wurden, wobei eine Kupplung die Einzugsrollen und Werkzeuge mit dem Motor verbindet.

Die Nachteile der kupplungsgesteuerten Maschinen (Kupplungsverschleiß, Schwankungen der Einzugslänge) wurden in den 1960er Jahren durch die Entwicklung segmentgesteuerter Federautomaten [4.13] beseitigt. Hierzu ist der kontinuierlich drehende Motor über eine Schwinge mit einem Segment verbunden, das in einer Richtung schwingend die Einzugsrollen antreibt und beim Rücklauf die Verbindung über einen Freilauf wieder trennt.

Die Nachteile einer Kupplung konnte man auch vermeiden, wenn man das Abschneiden ohne Stillsetzen der Einzugsrollen realisiert, so geschehen durch die Fa. Simplex mit dem sogenannten Rotations- Drahtabschneiden anfangs der 1960er Jahre.

1978 erschien am Markt der erste CNC- gesteuerte Federwindeautomat (Baureihe FUE der Firma Wafios), der zu vielen Diskussionen bei Maschinenherstellern und Federherstellern führte [4.18][4.99][4.10]. Aber schon die zweite Generation (Baureihe FUL) eroberte ab 1986 die Werkstätten der Federhersteller.

Parallel zur Entwicklung der Druckfederwindeautomaten vollzog sich die Entwicklung der Herstellung von *Drehfedern* (Schenkelfedern), bei denen der Federkörper jahrzehntelang weiterhin um einen Dorn gewickelt wurde. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts waren Maschinen mit mechanischem Antrieb und einer Kurvenwelle für das Abschneiden üblich. In den 1970er Jahren kamen Kurven zum Antrieb von Werkzeugen zur Fertigung der verschiedensten Federenden dazu. Später wurden dazu hydraulische oder pneumatische Antriebe eingesetzt. Ende der 1980er Jahre entstanden auch für Drehfederautomaten die erste CNC- Steuerungen.

Die vollautomatische Herstellung von *Zugfedern* wurde ebenfalls erst um 1962 gelöst. Bis dahin war es nur möglich, Zugfederkörper automatisch herzustellen, aber das Anbringen der Ösen erfolgte in Handarbeit oder mit nachgelagerten Maschinen. Der Fa. Wafios gelang es nach aufwändiger Entwicklung, einen Federwindeautomaten mit einer vollautomatisch arbeitenden Öseneinrichtung zu verbinden, der Automat ZO1 entstand. Dieser Automat und andere für größere Drahtdicken rationalisierten die Zugfederfertigung. Allerdings waren diese Maschinen nur für die Fertigung der „Deutschen Öse“ bzw. „Englischen Öse“ geeignet.

Eine andere Entwicklung betrieb die Fa. Hack. Sie kombinierte einen Drehfeder-Wickelautomaten mit einer nach dem Transferprinzip arbeitenden Ösmaschine, wobei die Öswerkzeuge hydraulisch angetrieben wurden. Damit wurde die Herstellung von Zugfedern mit Hakenösen ermöglicht.

In den 1960er Jahren wurde von *G. Murray* [P24] eine Zug- bzw. Drehfederherstellungsmaschine erfunden, die als US-Baird-System (**Bild 4.39**) nach dem gleichnamigen Maschinenhersteller bekannt wurde (Maschinenbezeichnung Springgenerator). Bei dieser Maschine erfolgte die Drahtzu-

fuhr durch die Mitte der Werkzeugplatte von der Rückseite der Maschine aus und der Draht wird durch entsprechende Werkzeuge abgebogen, z.B. wird zuerst eine Öse gebogen, dann der Federkörper gewickelt, die zweite Öse hergestellt und letztlich die Feder abgeschnitten.. Dieses Fertigungsprinzip regte die Entwicklung vieler Maschinenhersteller an und führte letztlich zu den heute bekannten Drehfederautomaten der Typen Itaya, FTU System 3, FMU- Reihe, Multiformer TM 6 usw. Mit diesem Herstellungsprinzip wurde auch die automatische Herstellung kompliziertester Ösenformen bei Zugfedern gelöst.

March 20, 1962 M. G. CLAY 3,026,012  
 WIRE GUIDE FOR SPRING-COILING MACHINES  
 Filed May 13, 1960 2 Sheets-Sheet 1

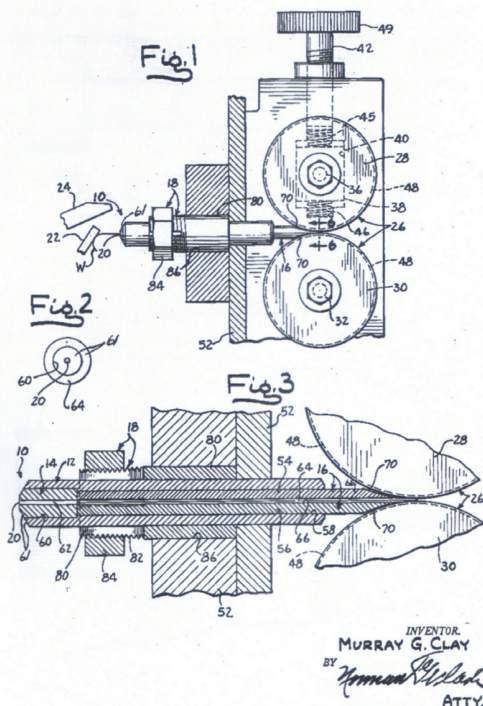


Bild 4.39: Schema des US-Baird-Systems nach [P24]

Die Herstellung von Zugfedern mit großer innerer Vorspannung war und ist ein ständiges Streben des Federherstellers. 1972 meldete *J. Huhnen* [P21] ein Patent für eine Wickelmaschine an, mit der durch die sogenannte Drill-Wickel- Technik Zugfederkörper mit erheblich größerer Vorspannung als mit dem üblichen Wickeln hergestellt werden konnten. Leider hat sich dieses Verfahren in der Massenfertigung nicht durchgesetzt.

### **4.3.2 Maschinen für die Herstellung von Formfedern aus Draht und Band**

Schon in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden 3- und 4- Schieber-Biegemaschinen entwickelt und gebaut, die die maschinelle Massenfertigung von Draht- und Bandfedern erlaubten. Ein Teil von ihnen konnte sogar mit einem Wickelwerk zur Drehfederherstellung versehen werden. Anfang der 1960er Jahre wurde die Entwicklung von sogenannten zentralgesteuerten Biegeautomaten bekannt ( ZUB- Technik der Fa. Finzer bzw. radiale Stanz-Biegeautomaten wie z.B. RM 35 und GRM 50 der Fa. Bihler). Diese Technik revolutionierte die Herstellung vieler Draht- und Bandfedern [4.6][4.97].

Selbstverständlich wurde dieses Grundprinzip ständig weiterentwickelt, kamen neuentwickelte Prozessmodule z.B. fürs Schweißen, Glühen, Messen dazu und später wurde ebenfalls die CNC-Technik eingeführt. Letztlich brauchte man die einzelnen Biegestationen auch nicht mehr mechanisch anzutreiben.

Andere Maschinenhersteller blieben bei einer Transfer- Arbeitsweise und konnten so auch leistungsfähige Maschinen zur Herstellung von Zug-, Dreh-, Drahtform- und Spiralfedern zur Verfügung stellen (z.B. die Maschinen Kombimat oder Spiralomat von Koradi).

Die Entwicklung der Windetechnik bei Drahtfedern blieb nicht ohne Einfluss auf die Verarbeitung von Bändern. Wurden z.B. Spiralfedern viele Jahrzehnte lang gewickelt, so wurden später auch dem Winde- bzw. US-Baird-Prinzip ähnliche Technologien bekannt. Die Herstellung von sog. Rollfedern wurde erleichtert, nachdem *E. E. Forster* 1952 Methoden zur Herstellung des Federpaketes veröffentlichte [4.23].

## 4.4 Einrichtungen für Federprüfungen

Die Ermittlung der Federkennlinie, insbesondere die Prüfung der Federkraft bei *statischer* Belastung erfolgte in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit sogenannten Federprüfwaagen, gebaut z. B. von den Firmen Pfister, Reicherter, Probat oder Tarnogrocki. Viele Jahrzehnte lang mussten dazu die Prüfstücke von Hand zu- und abgeführt und die Messergebnisse ebenso notiert werden. Später mit dem Entstehen von Fließfertigungen wurden auch die Prüfwaagen darin integriert bzw. Prüfautomaten mit mechanischer Zuführung gebaut. Als Beispiel sei die Setz- und Prüfmaschine AE 100 von Reicherter genannt.

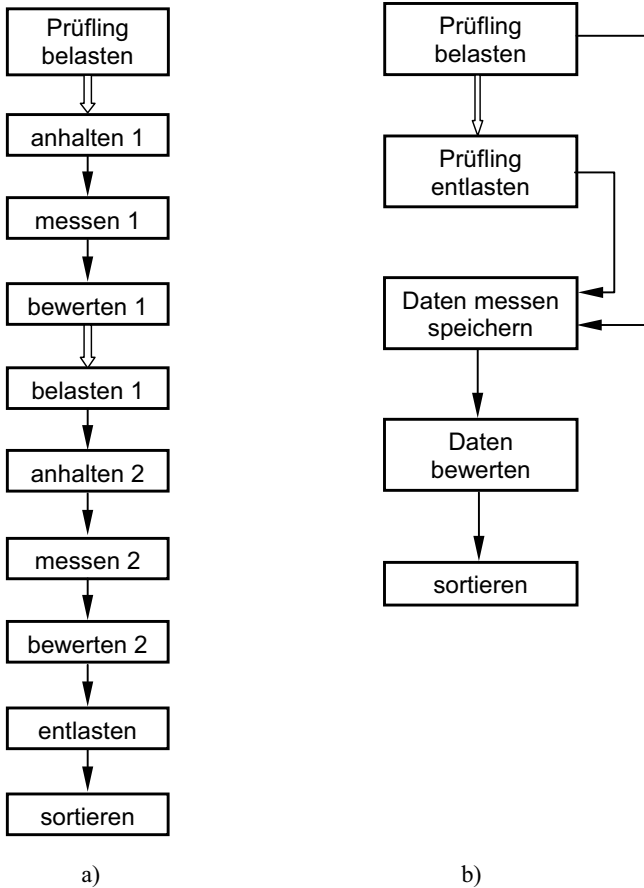
Mit der Verbreitung der EDV gab es ebenfalls bei Federprüfwaagen eine rasche Entwicklung, wenn auch verspätet erst in den 1980er Jahren. Das sogenannte „Dynamische Messen“ [4.107] [4.108] erlaubte eine Rationalisierung des Prüfarbeitsganges, wie **Bild 4.40** erkennen lässt.

Zur Rationalisierung gehörte auch die rechnergestützte Erfassung und Auswertung der Messergebnisse, die Weitergabe der Prüfstücke an eine Sortieranlage usw. Weiterhin wurde nicht nur die Erfassung mehrerer Prüfpunkte, sondern auch die Prüfung von speziellen Kennlinien, z.B. von Spezialtellerfedern, ermöglicht.

Eine weitere Aufgabe, die die Prüfmaschinenhersteller im vergangenen Jahrhundert lösten, war die Entwicklung von Messsystemen für die Prüfung der Planparallelität von Federn [4.83], die Hüllkreis- oder Querkraftmessung [4.28] usw.

Die Prüfung der Dauerschwingfestigkeit von Federn führte zu verschiedenen speziellen Schwingmaschinen, einmal für die Stichprobenkontrolle, aber auch zu Prüfmaschinen für die Serienprüfung, die vorwiegend mit einer sinusförmigen Zeit-Weg-Kurve arbeiten [4.76]. Die von der Fa. Bosch entwickelte Federschwinde [4.39] erlaubt es, Federn einer Sorte gleichzeitig mit unterschiedlichen Hüben zu prüfen, um schnell eine Wöhlerlinie erzielen zu können.

Diese Prüfeinrichtungen erlauben natürlich keine Aussage bei stoßartig belasteten Federn. Schon in den 1930er Jahren wurde zur Prüfung von Waffen- Druckfedern durch die Mauserwerke ein pressluftbetriebenes Schlagwerk benutzt. Weitere Prüfmöglichkeiten zeigt [4.76] auf.



**Bild 4.40:** Veränderung des Prüfablaufes durch das „Dynamische Messen“ nach [4.107] a) bisheriges Verfahren; b) neue Technologie



## **5 Die Entwicklung der Auslegungsrechnungen von Federn**

### **5.1 Die Elastizität der festen Stoffe**

#### **5.1.1 Werkstoffelastizität und Federfunktion**

Als *Federn* werden Maschinenelemente bezeichnet, deren Hauptfunktion darin besteht, bei geeigneter Form auf das Einwirken äußerer Kräfte sich zu verformen und damit potentielle Energie zu speichern, die zu gegebener Zeit dann wieder abgegeben werden kann. Das reversible Energiespeichervermögen hat auch den Begriff "Elastische Federn" geprägt, der zur Unterscheidung und Abgrenzung dieser Federn zu anderen Maschinen- und Konstruktionselementen mit gleichem Namen (Passfeder, Holzfederleiste ... ) vielfach benutzt wird. Obwohl der Begriff "Feder" für ein "federndes" Maschinenelement allein schon aussagekräftig und ausreichend eingebürgert ist, wird der Zusatz "elastisch" noch in einigen Fällen zur eindeutigen Abgrenzung herangezogen.

In der historischen Entwicklung dieses Maschinenelements spielten die elastischen Eigenschaften der Werkstoffe, die für Federn eingesetzt werden konnten, eine besondere Rolle.

Die *Elastizität* ist, wie diese Darlegungen zeigen, wichtigste Stoffeigenschaft, durch die das Maschinenelement "Feder" geprägt wird. Dabei kommt es besonders darauf an, dass die vom Bauelement zu ertragenden Verformungen in ihrer Größe so bemessen werden, dass sie sich nach Wegnahme der Last wieder vollständig "zurückstellen" können.

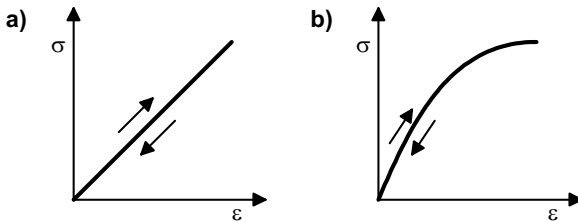
Für die Berechnung der Federn zum Zwecke einer funktionsgerechten Auslegung bildet die Elastizitätstheorie eine wesentliche Grundlage. Auf die Entwicklung dieser Grundlage soll im folgenden eingegangen werden. Zunächst jedoch einige Ausführungen zum Begriff "Elastizität".

#### **5.1.2 Zum Begriff der Elastizität fester Stoffe**

Aus heutiger Sicht wird als *Elastizität* eines Werkstoffs seine Eigenschaft bezeichnet, bei Belastung seine Gestalt (Form, Größe) zu ändern und nach Wegnahme der Last die ursprüngliche Gestalt wieder anzunehmen. Beim Einwirken äußerer Lasten werden im Werkstoff innere Spannungen hervorgerufen. Diese sind bestrebt, die von dieser Belastung hervorgerufenen

Verformungen wieder rückgängig zu machen. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen äußerer Belastung und den inneren Werkstoffreaktionen ein. Der dabei vom Werkstoff dem Einwirken der äußeren Belastungen entgegengebrachte Widerstand gegen das Verschieben oder Trennen seiner Elementarteilchen wird als *Festigkeit* bezeichnet.

*Elastisches* Verhalten der Werkstoffe liegt vor, wenn sich nach der Belastung keine bleibenden Verformungen einstellen, also das Material nach seiner Entlastung wieder vollständig in seinen Ausgangszustand zurückkehrt. Bei diesem Belastungsvorgang wird keine Energie dissipiert. Es liegt ein reversibles Werkstoffverhalten vor. Belastungs- und Entlastungskurve im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (**Bild 5.1**) sind identisch. Der Spannungs-Dehnungs-Zusammenhang kann linear oder nichtlinear sein.



**Bild 5.1:** Elastisches Werkstoffverhalten. a) linear; b) nichtlinear

Für den Einsatz als Federn waren besonders solche Werkstoffe gefragt, deren elastisches Formänderungsvermögen gut ausgeprägt war. Insbesondere war ein solches Werkstoffverhalten gewünscht, das sich durch einen großen Bereich auszeichnet, bei dem zwischen den Spannungen und den Verformungen ein linearer Zusammenhang bestand. Dieser lässt sich durch einen Proportionalitätsfaktor ausdrücken, der das Verhältnis von Spannung zu Verformung beschreibt und bei Ausbildung von Normalspannungen als *Elastizitätsmodul* sowie bei Ausbildung von Schubspannungen als *Schub-* oder *Gleitmodul* bezeichnet wird. Es sind also für Federn Werkstoffe gefragt, bei denen

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{bzw.} \quad \tau = G \cdot \gamma \quad (5.1)$$

in einem möglichst großen Bereich der Beanspruchung gilt.

## 5.2 Die Herausbildung der Elastizitätslehre

### 5.2.1 Anfänge der Elastizitätstheorie

Wie bereits an anderen Stellen ausgeführt, war man schon im *Altertum* bestrebt, für Bauelemente mit Federaufgaben solche Werkstoffe auszuwählen, die sich durch eine besondere *Elastizität* auszeichnen. Als Beispiel dazu wird in der Literatur [5.20][5.62] immer wieder aus *Philon von Byzanz*, Mechanik, Buch 4 das Vorgehen bei der Prüfung von Schwertern zitiert (s. a. Abschn. 2.2.2).

Weiterhin ist bekannt, dass *Archimedes* (287 - 212 v. d. Z.) Wurfeinrichtungen gebaut hat, bei denen die Elastizität von Stoffen (insbesondere von Holz) genutzt wurde. Erste Anwendungen der Mathematik auf die Beschreibung der Mechanik sind diesem griechischen Mathematiker und Physiker zuzuschreiben.

Von *Leonardo da Vinci* (1452 - 1519) sind eine Reihe Konstruktionen überliefert, in denen Federn eine bedeutende Rolle spielen. Dabei wurden auch vereinzelt Berechnungen und Untersuchungen zum Verhalten verschiedener Materialien vorgenommen. In vielen Fällen, beispielsweise der Balkenbiegung und der Zerreißfestigkeit von Drähten wurden von ihm Aussagen von hohem Allgemeinheitsgrad gemacht. In seinen Aufzeichnungen findet man im Zusammenhang mit der Erklärung der Vorgänge beim Biegen bereits den Begriff "Mittellinie" (heutiger Begriff: Neutrale Faser, neutrale Schicht - erste Erwähnung in dieser Form wird dem englischen Ingenieur *Thomas Tredgold* zugeschrieben [5.52]). An der Biegung eines Eisendrahtes und einer Blattfeder werden von ihm erkannt und beschrieben, dass sich die Randfasern (Randgebiete, Randschichten) gegenüber der Mittellinie verkürzen bzw. verlängern. Diese Zusammenhänge sind inzwischen zu klassischen Bestandteilen der Festigkeitslehre geworden. Über die Entwicklung einer Elastizitätstheorie kann jedoch in diesem Zusammenhang nicht berichtet werden. Hierzu wurden erst von *Robert Hooke* auf der Basis umfangreicher Versuche die grundlegenden Formulierungen vorgenommen.

Auch *Galileo Galilei* (1564 - 1642) stellte Untersuchungen und theoretische Überlegungen über das elastische Verhalten von Materialien an, die in seinem für die Physik wichtigen Werk "Unterhaltungen und Beweisführungen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik (d. h. die Festigkeitslehre) und die Lehre von den örtlichen Bewegungen (Lehre von Fall und Wurf)" (Leyden 1638) enthalten sind [5.52][5.15].

*Robert Hooke* (1635 - 1703), ein hervorragender Experimentator [5.13] [5.11], leistete durch seine umfangreichen Versuche zur Elastizität der fes-

ten Körper den entscheidenden Beitrag zur Begründung der Elastizitätstheorie. Durch ihn ist der an zahlreichen Versuchen, vor allem an Federn und Drähten (s. **Bild 5.3**) gefundene lineare Zusammenhang von Kraft und Verformung ausgewertet und in dem nach ihm benannten Gesetz formuliert worden, wonach die elastische Deformation eines festen Körpers bei nicht zu hoher Beanspruchung der mechanischen Spannung proportional ist, die durch eine äußere Kraftwirkung verursacht wurde (Die Begriffe Spannung und Dehnung wurden erst später verwendet).

Diese *Hooke'sche* Entdeckung und Gesetzformulierung (1678)

$$\Delta l \sim F \quad (5.2)$$

(das kürzeste Gesetz der Physik: *ut tensio sic vis* - wie die Ausdehnung, so die Kraft) kann wohl als Beginn der Elastizitäts- und Festigkeitslehre gelten, die ihrerseits wieder als die entscheidende Grundlage für die Federtheorie angesehen werden kann. **Bild 5.2** zeigt den Titel zu seinen Vorlesungen über die Kraftwirkung von Federn. Hier ist auch eine erste Quelle vorhanden, die die Elastizität der festen Körper mit dem Namen des Maschinenelements "Feder" verbindet.

## 5.2.2 Der weitere Ausbau der Elastizitätstheorie

Die Bemühungen um die Klärung zahlreicher Zusammenhänge in der Mechanik waren im Mittelalter zunächst experimentell geprägt. Dem gezielten Experiment ging eine gedankliche Durchdringung des technischen Vorgangs voraus, wobei in fast allen Fällen von Naturbeobachtungen ausgegangen wurde. Als Beispiele seien hier die Bemühungen um die Beschreibung des Verlaufs von Geschossen mit dem Ziel der Verbesserung der Treffsicherheit, die Faszination der Bewegung der Himmelskörper, die Fragen der Elastizität und Bruchfestigkeit von Materialien, die im Bauwesen verwendet wurden, sowie die Fragen der Statik, des Wirkens von Kräften in Bauwerken, angeführt [5.173].

Die Entwicklung der als ältester Teil der Physik geltenden Mechanik zu einer Wissenschaft hat sich maßgeblich im 17. Jahrhundert vollzogen. Vorher dominierte mehr die Erfahrung aus zufällig Gefundenem als die Wissenschaft. Erkenntnisse und Ergebnisse aus Beobachtungen der Natur rangierten vor Ergebnissen eines systematischen und ununterbrochenen Nachdenkens, wie *Newton* (1642 - 1726) auf eine Befragung zum Finden des Gravitationsgesetzes antwortete [5.180].

# LECTURE De Potentia Restitutiva, OR OF SPRING

Explaining the Power of Springing Bodies.

To which are added some

## COLLECTIONS

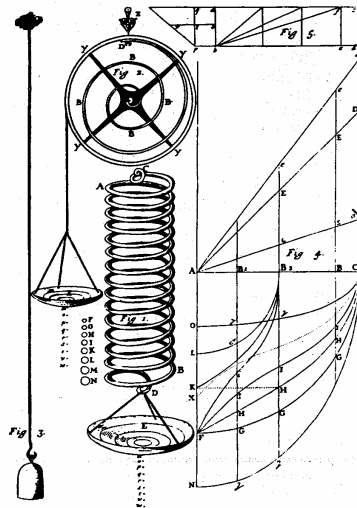
Viz.

*A Description of Dr. Pappus Wind-Fountain and Force-Dump.  
Mr. Young's Observation concerning natural Fountains.  
Some other Considerations concerning that Subject.  
Captain Sturmy's remark of a Subterranean Cave and Cistern  
Mr. G. T. Observations made on the Pike of Teneriff, 1674.  
Some Reflections and Conjectures on the late Eruption.  
A Relation of a late Eruption in the Isle of Palma.*

By ROBERT HOOKE. S.R.S.

LONDON,

Printed for John Martyn Printer to the Royal Society,  
at the Bell in St. Pauls Church-Yard, 1678.

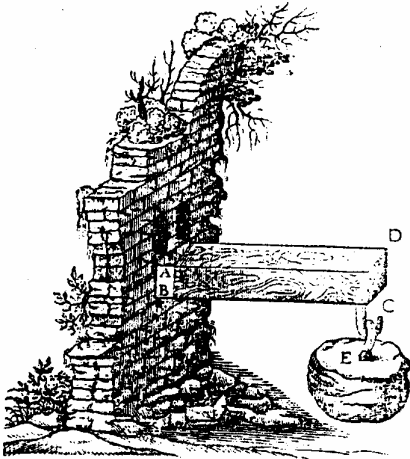


**Bild 5.2:** Titelblatt der Abhandlungen von R. Hooke über die Kraftwirkungen an Federkörpern [5.65]

**Bild 5.3:** Versuchsanordnungen von R. Hooke zu den Untersuchungen der Werkstoffelastizität [5.15][5.65][5.68]

Zunehmend waren jedoch Bemühungen zu erkennen, auf der Basis naturgesetzlicher Zusammenhänge mathematisch fundierte Vorgehensweisen zur Beschreibung mechanischer Vorgänge zu nutzen. Wichtige Grundlagen hierfür wurden von *Galilei* geschaffen, die von *Newton*, *Leibniz*, *Euler*, *Lagrange* und anderen weiterentwickelt wurden. Diese mathematischen Grundlagen haben zur Weiterentwicklung der Elastizitätstheorie wesentlich beigetragen.

Darlegungen von *Galilei* (s. Abschn. 3.1.2) ist u. a. zu entnehmen, dass bereits bekannt war, die zum Zerreißen eines Stabes notwendige Kraft ist der Größe des Stabquerschnitts proportional. Diesem großen italienischen Denker verdankt man auch die ersten systematischen Untersuchungen zur Festigkeit von Stoffen. So stellte er Überlegungen zum Verhältnis von Zug- und Bruchfestigkeit an, wobei theoretische Zusammenhänge aus Versuchen an einem (Biege-)Balken mit rechteckigem Querschnitt, der an einem Ende eingemauert war, abgeleitet wurden. **Bild 5.4** zeigt Skizzen *Galileis* zu diesen Überlegungen.



**Bild 5.4:** Skizzen von *Galilei* (aus “Diskorsi”, Leyden, 1638) zur Ermittlung der Bruchfestigkeit einseitig eingespannter (eingemauerter) Balken [5.15]

Im 16. und 17. Jahrhundert vollzogen sich auch auf mathematischem Gebiet zahlreiche Entwicklungen, die es ermöglichten, die mechanischen Vorgänge und im besonderen die Vorgänge bei der Verformung von Körpern auch theoretisch zu fassen und zu beschreiben. So sind im Zuge der Behandlung von Wurf und Fall durch *Galilei* erste Ansätze zur Integral- und Differentialrechnung zu verzeichnen, die dann später von *Newton* (1642 - 1726) und *Leibniz* (1646 - 1716) weiterentwickelt wurden.

In der darauf folgenden Zeit sind zahlreiche Einzelprobleme der Mechanik und speziell der Festigkeitslehre von den Brüdern ***Bernoulli*** (*Jakob* 1654 - 1705; *Johann* 1667 - 1716), ***Leonhard Euler*** (1707 - 1783), ***Jean d’Alembert*** (1717 - 1783), ***Joseph Louis Lagrange*** (1736 - 1813), ***Siméon-Denis Poisson*** (1781 - 1840), ***Claude Louis Marie Henri Navier*** (1785 - 1836), ***Adhemar Jean Claude Barré de Saint-Venant*** (1797 - 1886), ***Johann Albert Eytelwein*** (1764 - 1848), ***Julius Ludwig Weisbach*** (1806 - 1871), ***Otto Christian Mohr*** (1835 - 1918) und vielen anderen [5.15][5.180] mathematisch behandelt und gesetzmäßig formuliert worden. Diese großen Gelehrten des 17., 18. und 19. Jahrhunderts haben damit entscheidend zu einer wissenschaftlichen Fundierung und Weiterentwicklung der Elastizitätstheorie und der Festigkeitslehre beigetragen. Sie waren Repräsentanten einer Naturwissenschaft, in der auch technische Probleme mit entsprechenden Kontakten zur Praxis enthalten waren. Ohne diese gegenseitige Beeinflussung von Mathematik und Mechanik war eine wissenschaftliche Ent-

wicklung der Festigkeitslehre mit den maßgeblichen Erkenntnissen der Elastizitätstheorie seit *Hooke*, die mit den Arbeiten *Naviers* einen gewissen Abschluß gefunden hatte, nicht möglich. Wesentliche praktische Impulse für die Entwicklung der Festigkeitslehre sind auch von der Bau- und der Werkstofftechnik gekommen, worauf im Folgenden eingegangen werden soll.

## 5.3 Entwicklung von Theorie und Praxis der Festigkeitslehre

### 5.3.1 Auswirkungen des Bauwesens

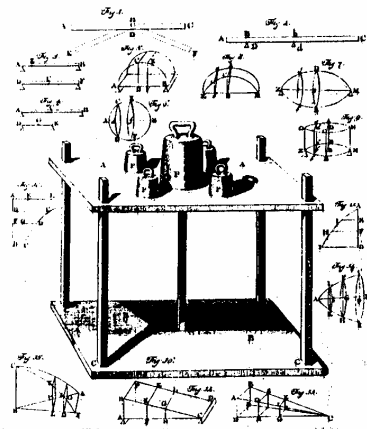
Seit alters her beschäftigten sich Ingenieure und Bautechniker mit der Tragfähigkeit von Bauwerken besonderer Form (Kuppelbauten, Gewölbe, Turm- und Brückenbauten) und mit dem Festigkeitsverhalten der verwendeten Baustoffe. Nicht zuletzt resultieren viele theoretische Ansätze, Verfahren und Lehrsätze der Statik aus Untersuchungen und Betrachtungen des Bauwesens, die wiederum für die Entwicklung der Festigkeitslehre bedeutungsvoll waren.

Zunächst ist anzumerken, dass zahlreiche Schriften des 17. Jahrhunderts, so von *Nicolas François Blondel* (1617 - 1686) und *Jacob Leupold* (1674 - 1727), das Bestreben erkennen lassen, Konstruktionsregeln und Dimensionierungsvorschriften der Praxis zusammenzustellen, nach dem Stand der Mathematik zu überarbeiten und das Erfahrungswissen in Tabellenform aufzuarbeiten. Dadurch war die Möglichkeit einer ständigen praktischen Überprüfung dieses Wissens gegeben. Nicht Bewährtes konnte eliminiert werden, wodurch sich die Zuverlässigkeit der vorhandenen Regeln und Handlungsweisen erhöhte. Auch viele von Naturwissenschaftlern im Ringen um die Biegetheorie ermittelten Festigkeitszahlen wichtiger Baustoffe und Bauteile fanden in der technischen Literatur ihren Niederschlag. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang die Arbeiten des französischen Gelehrten *Edmé Mariotte* (1620 - 1684) und des holländischen Experimentators *Pieter van Musschenbroek* (1692 - 1761).

Es wuchs das Interesse an den Zusammenhängen zwischen Struktur und Wirkungsweise von Baukonstruktionen. Dieses Eindringen in konstruktive Bereiche der Bautechnik führte auch dazu, qualitative Modellvorstellungen und Hypothesen über das Tragverhalten der Baukonstruktionen zu formulieren, wozu Anfang des 18. Jahrhunderts die Voraussetzungen seitens der Mathematik und Mechanik gegeben waren.

Nachdem bereits im 17. Jahrhundert die Balkenfestigkeit allgemeines wissenschaftliches Interesse fand, wandte man sich jetzt dem Knickverhalten von Stäben zu. *Musschenbroek* beschäftigte sich bereits damit, wie man seinen Aufzeichnungen (s. **Bild 5.5**) entnehmen kann. Von *Euler* sind 1744 entscheidende Ansätze zur Lösung des Knickproblems entwickelt worden. Er löste damit als erster ein Eigenwertproblem der Elastizitätstheorie. Seine Knickformel hat noch heute ihren Platz in der Festigkeitslehre.

Als weiteres Beispiel für Anregungen, die von der Bautechnik kamen, soll angeführt werden, dass komplizierte Tragwerkkonstruktionen, insbesondere Bogen- und Gewölbekonstruktionen, viele Gelehrte und Baumeister zu Überlegungen für theoretische Lösungen veranlasste. Von *Hooke* wurde 1675 die offenbar schon im Altertum empirisch genutzte Erkenntnis formuliert, dass die ideale Bogenachse einer umgekehrten Kettenlinie folgen müsse. Ausgangs des 17. Jahrhunderts fanden dann *Jakob* und *Johann Bernoulli*, *Gottfried Wilhelm Leibniz* und *Christian Huygens* (1629 - 1695) einen analytischen Ausdruck, mit dem die Kettenlinie hinreichend genau beschrieben werden konnte [5.15]. Unter den Gewölbetheorien spielte die Stützlinientheorie eine besondere Rolle, die auf einem von *Pierre Varignon* (1654 - 1722) 1687 hergestellten Zusammenhang von Kraft- und Seileck beruhte.



**Bild 5.5:** Skizzen von *Musschenbroek* zur Untersuchung des Knickproblems [5.15]

Es setzte sich auch immer mehr die Einsicht durch, dass die praktische Nutzung und Weiterentwicklung der Theorien zur Statik und Elastizität eine gründliche Kenntnis der Materialeigenschaften voraussetzt. Für die Kon-



struktionspraxis waren aus vielen umfangreichen Versuchen zur Überprüfung baumechanischer Theorien gewonnene Materialkennwerte zuverlässige Hilfsmittel, die in Tabellenform in der Ingenieurliteratur Einzug hielten. An Baustoffen vorgenommene Festigkeitsuntersuchungen wurden später auch auf Bauteile aus Guss- und Schmiedeeisen übertragen.

Die angeführten Beispiele belegen, in welchem Maße die allgemeine Technikentwicklung mit der Entwicklung von Mathematik und Naturwissenschaft, der Bautechnik und der Werkstoffentwicklung beeinflusst wurde und ihrerseits wieder auf den Fortgang der Entwicklung der Festigkeitslehre beigetragen hat.

### 5.3.2 Formulierung wesentlicher Grundsätze der Festigkeitslehre

Aus den Versuchen *Galileis* (s. Abschn. 5.2.2) resultierten Überlegungen zur Verteilung der Zugspannungen in Biegebalken. Seine Annahmen dazu gehen von einem "Drehpunkt" an der unteren Einspannkante des eingemauerten Biegebalkens aus (s. **Bild 5.4**). Die Summe der statischen Momente bezüglich dieses Drehpunktes liefert

$$\sigma \cdot b \cdot h \cdot (h/2) = F \cdot l \quad (5.3)$$

und damit

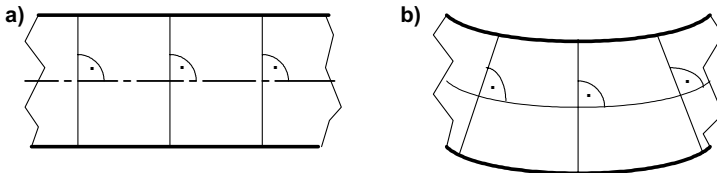
$$F = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot \frac{b \cdot h^2}{l} \quad \text{oder} \quad \sigma = \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{2 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (5.4)$$

*Galilei* berücksichtigte bei diesem Ansatz nicht das elastische Werkstoffverhalten. Sein Ansatz gilt deshalb nur annähernd für spröde Werkstoffe. Wenn man die später von *Hooke* formulierten Zusammenhänge von Verformung und Kraft (s. Gl. (5.2)) berücksichtigt, ist der Faktor 1/2 durch 1/6 zu ersetzen. Trotz dieses fehlerhaften Ergebnisses werden durch diesen Ansatz die Grundlagen für einen weiteren Ausbau der Biegetheorie geschaffen. *Edmé Mariotte* (1620 - 1684), der 1680 unabhängig von *Hooke* die Proportionalität von Dehnung und Kraft feststellte, befasste sich als erster mit der Biegung eines einseitig eingespannten Balkens unter Berücksichtigung der Elastizität des Materials. Er geht, wie schon von *L. da Vinci* erkannt, davon aus, dass die "Fasern" im oberen Teil des Balkens gedehnt und im unteren

Teil gestaucht werden und setzt den Drehpunkt in der Mitte des Querschnitts (also bei  $h/2$ ) an. Damit wäre er zum richtigen Ergebnis gelangt, wenn von ihm nicht ein Gedankenfehler anderer Art gemacht worden wäre. Er fand nicht  $\sigma = 6 \cdot F \cdot l / b \cdot h^2$ , sondern nur  $\sigma = 3 \cdot F \cdot l / b \cdot h^2$  [5.180]. (Mit  $\sigma$  wird jeweils die in den Randfasern auftretende höchste Spannung bezeichnet, wobei der Spannungsbegriff erst später eingeführt wurde.)

Von **Jakob Bernoulli** (1654 - 1705) wird erstmals die Frage bearbeitet, welche Form die ursprünglich gerade Achse eines Biegebalkens durch die Biegung annimmt. Im Zeitraum zwischen 1691 und 1705 hatte sich *Bernoulli* wiederholt diesem Problem der Bestimmung der *Elastica*, der sogenannten elastischen Linie des Biegebalkens, zugewandt. Dabei kommen ihm die gerade von *Leibniz* entwickelten Grundlagen (Grundgedanken) zur Infinitesimal- bzw. Differentialrechnung zugute.

*Bernoulli* formuliert eine wichtige Voraussetzung, die als grundlegende Annahme der technischen Balkenbiegelehre gilt, die **Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte**, die auch als Normalenhypothese bezeichnet wird. Sie besagt, dass die vor der Verformung zur Balkenachse senkrechten Querschnitte bei der Verformung eben und normal zur Balkenachse bleiben, wie **Bild 5.6** zeigt. Nachbarquerschnitte verdrehen sich, erfahren aber keine Verwölbung. Das schließt aber wiederum die Existenz von Schubspannungen im Querschnitt aus.



**Bild 5.6:** Die *Bernoulli*-Hypothese vom Ebenbleiben der Querschnitte beim Biegen nach [5.52]. a) vor der Biegung; b) nach der Biegung

Unter dieser Voraussetzung und bei Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes (einachsiger Spannungszustand) gilt dann, dass die Krümmung  $k = 1/R$  der elastischen Linie ( $R$ : Krümmungsradius) an jeder Stelle dem dort vorhandenem Biegemoment  $M$  der äußeren Kräfte proportional ist. Ausgedrückt in der Sprache der sich zu dieser Zeit mächtig entfaltenden Differential- und Integralrechnung hat *Bernoulli* die Differentialgleichung für die elastische Linie in der Form

$$k = \frac{1}{R} = \frac{y''}{[1 + y'^2]^{3/2}} = C \cdot M \quad (5.5)$$

aufgestellt, in der  $C$  bei konstantem Balkenquerschnitt eine Konstante,  $y = f(x)$  die Auslenkung des Balkens an der Stelle  $x$  und  $M$  das Biegemoment an der Stelle  $x$  bedeuten [5.52][5.15] [5.180].

Mit diesen Zusammenhängen zwischen Biegemoment und Biegeverformung sowie der bereits von *Galilei* bzw. *Mariotte* formulierten Abhängigkeit von Biegemoment, Biegespannung und Querschnitt (Gleichungen (5.3) und (5.4)) waren die entscheidenden Grundlagen für die Berechnung von **Biegefedern** bereits Anfang des 18. Jahrhunderts gegeben.

### 5.3.3 Die Weiterentwicklung der Festigkeitslehre im 18. und 19. Jahrhundert

Durch *Leonhard Euler* (1707 - 1783, s. Abschn. 5.2.2) und *Charles Augustin Coulomb* (1736 - 1806) erfuhr die Elastizitätstheorie nach *Bernoulli* entscheidende Weiterentwicklungen. Von *Coulomb* stammt die erste zusammenfassende Arbeit über die praktisch wichtigsten Fälle der Festigkeitslehre, die er im "Essai sur une Application ...", Paris 1776, veröffentlichte [5.15]. **Bild 5.7** zeigt Skizzen zu seinen Festigkeitsversuchen aus diesem Essai.

In Bezug auf die Balkenbiegung nimmt *Coulomb*, wie bereits von *L. da Vinci* beschrieben, im gebogenen Balken gedehnte und verkürzte Fasern an, die durch die sogenannte spannungsfreie neutrale Achse (Faser) bzw. Fläche voneinander getrennt sind. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Bezeichnung "neutrale Achse" erst später durch den englischen Baumeister und neben *Young* bedeutendsten Vertreter der Festigkeitslehre *Thomas Tredgold* (1788 - 1829) eingeführt wurde. *Coulomb* erkannte auch, dass im Querschnitt als Folge der Querkräfte Schubspannungen auftreten. Von ihm sind auch Torsionsprobleme behandelt worden.

Zu erwähnen ist ferner, dass *Coulomb* bestrebt war, praxisrelevante Theorien zu entwickeln. Er gab Näherungslösungen vor verwickelten mathematischen Ansätzen den Vorzug und beschränkte sich auf praktisch bedeutsame Fälle. Gültigkeitsbedingungen und -bereiche für Näherungslösungen werden angegeben. Vor allem löste *Coulomb* das klassische Problem der Balkenfestigkeit. Er übertrug die an bestimmten "Grundstrukturen" gewonnene elastische Balkentheorie auf andere Tragstrukturen, wobei die besonderen

traglasttheoretischen Gesichtspunkte berücksichtigt wurden [5.15] (s.a. [5.132][5.171][5.40][5.179][5.10][5.33]).

In seinem 1805 erschienenen Lehrbuch der praktischen Mechanik wird von *Olinthus Gregory* (1774 - 1841) erstmals die weitaus praktikablere Leibniz'sche Differentialschreibweise in die Mechanik eingeführt.

Zahlreiche Versuche zur Erforschung des Widerstands elastischer Körper wurden vom englischen Arzt und Physiker *Thomas Young* (1773 - 1829) durchgeführt. **Bild 5.8** zeigt einige Skizzen zu seinen Versuchen. Aus Versuchen zur Balkenbiegung und aus Druckversuchen leitete er Schlussfolgerungen für eine materialspezifische Größe ab, einen Proportionalitätsfaktor, der das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung (Hooke'sches Gesetz) ausdrückt. Dieser Faktor wird zunächst nach ihm als "Young's modulus" bezeichnet und später als Elastizitätsmodul  $E$

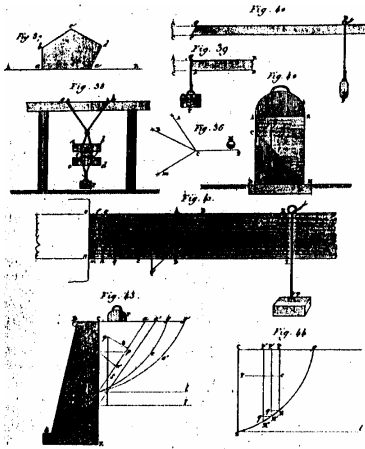
$$E = \sigma/\varepsilon \quad (\sigma = E \cdot \varepsilon) \quad (5.6)$$

in die Festigkeitslehre eingeführt.

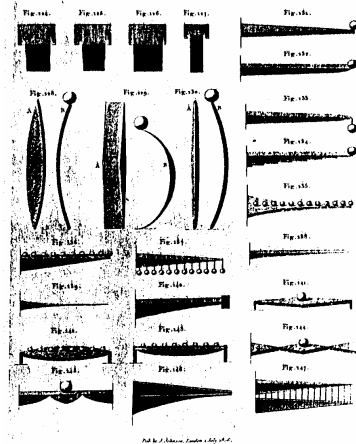
Eine wesentliche Weiterentwicklung erfuhr die Elastizitätstheorie durch die Arbeiten von *Claude Louis Marie Henri Navier* (1785 - 1836). Angeregt durch die vielen Fragen, die ihm als Lehrer an der französischen Bauingenieurschule "Ecole des Ponts et Chaussées" in Paris die Baumechanik stellte (insbesondere der Brückenbau), beschäftigte er sich vorwiegend mit Tragwerksproblemen. Als Hauptaufgabe der Baumechanik wurde dabei von ihm die Bestimmung der Formänderung und der Bruchlasten von Tragwerken angesehen. In seinem 1826 erschienenen Hauptwerk "Résumé des Leçons ... " werden die von ihm gefundenen Theorien mit den unter verschiedenen Ansätzen gewonnenen Ergebnissen seiner Vorgänger verknüpft, zum Teil neu gefasst und geordnet und so das Wissenschaftsgebäude der klassischen Baumechanik geformt. Im Mittelpunkt seiner Baumechanik stand die Aufstellung der technischen Biegetheorie. Er formulierte sie nach einigen elastizitätstheoretischen Vorarbeiten, die ihm 1824 die Aufnahme in die Akademie der Wissenschaften zu Paris einbrachten, in seinem Hauptwerk. *Navier* gilt als Begründer des Erkenntnisystems und Wissenschaftskonzepts der klassischen Baumechanik.

Die bedeutendste Leistung für das Gebiet der Technischen Mechanik stellt zweifellos die lange Zeit seinen Namen tragende Formulierung der technischen Biegetheorie dar. Die noch heute gültige Fassung der Differentialgleichung der elastischen Linie von Biegebalken geht auf *Navier* zurück. Durch molekulartheoretische Überlegungen auf der Basis des Kräftegleichgewichts am Körperelement wurden dabei die Ansätze seiner Vorgänger (s. a. Gl. (5.5)) vervollkommnet, die allgemeinen Elastizitätsgleichungen auf-

gestellt und damit die Theorie der Balkenbiegung erweitert. Auf die Zuverlässigkeit seiner Berechnungsverfahren legte er großen Wert. Aus der Modellbildung resultierende Gültigkeitsbereiche werden stets genannt. Auch Sicherheitsfaktoren werden bereits verwendet. Dort, wo keine geschlossene Lösungen möglich waren, sind auch Näherungslösungen oder induktive Methoden von ihm angegeben worden.



**Bild 5.7:** Skizzen von *Coulomb* zu seinen Balken-, Säulen- und Erd-druckversuchen (5.15)



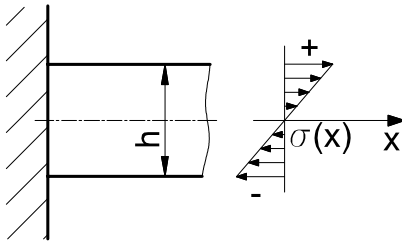
**Bild 5.8:** Skizzen von *Thomas Young* zu Untersuchungen der Balkenbiegung, Knickung und Druckbeanspruchung von Säulen [5.15]

Als direkte Folge der Bernoulli'schen Normalenhypothese (s. Abschn. 5.3.2) wird das nach ihm benannte **Geradliniengesetz** formuliert, nach dem die Spannungen im Biegebalken linear über die Balkenhöhe  $h$  verteilt sind, wie **Bild 5.9** zeigt [5.180].

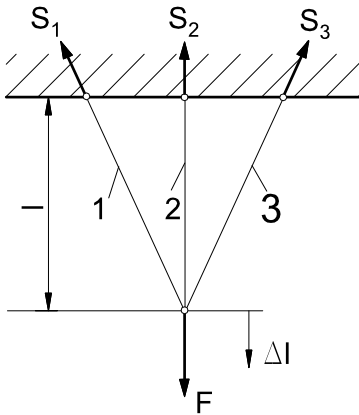
Ein ebener Dreistabverband nach **Bild 5.10** ist ein Fachwerk, das 1-fach statisch unbestimmt ist. Dieses Beispiel wird in der Festigkeitslehre als **Navier'sches Problem** bezeichnet. *Navier* setzte zur Lösung dieses Problems neben den Gleichgewichtsbedingungen die Verformungen des Stabwerkes an. Durch diese zusätzliche Gleichung lässt sich dann die dritte Stabkraft bestimmen.

Von *Navier* stammen auch erste Ansätze zur allgemeinen Torsionstheorie des Balkens, die von seinem Schüler *Adhemar Jean Claude Barré de Saint-Venant* (1797 - 1886) vervollkommenet und zu einer einwandfreien Theorie der Torsion weiterentwickelt wurde [5.52][5.15][5.180].

Durch die Arbeiten von *Saint-Venant* erfuhr die technische Elastizitätslehre zunächst einen gewissen Abschluss. Für die **Berechnung von Federn** waren damit die entscheidenden Grundlagen seitens der Festigkeitslehre gegeben. Sie waren nun auf die derzeit bekannten Formen von Blatt- und Schraubensfedern zu übertragen.



**Bild 5.9:** Spannungsverteilung im Querschnitt eines Biegebalkens (Geradlinien-gesetz nach *Navier*)



**Bild 5.10:** Dreistabverband als Beispiel eines 1-fach statisch unbestimmten Fachwerks (*Navier'sches Problem*)

### 5.3.4 Die Frage nach den ertragbaren Werkstoffbeanspruchungen

Die Bemühungen, Tragfähigkeitsangaben für Werkstoffe zu besitzen, gehen wiederum von der Bautechnik aber auch vom Bergbau aus. Zunächst wurden Probleme zur Erddrucktheorie, beispielsweise durch *Bernard Forest de Bélidor* (1697 - 1761), bearbeitet, um Fragen der Widerlagergestaltung zu beantworten. Von *Bélidor* stammt auch eine Definition der Mechanik als Wissenschaft, in der das Kräftegleichgewicht bei Betrachtungen der Bewegung der Körper und der Schwerkraftwirkung in den Mittelpunkt gestellt wird.

*Abraham Gottlob Werner* (1749 - 1817) verfasste eine Schrift mit dem Titel "Von den verschiedenen Graden der Festigkeit des Gesteins als dem Hauptgrunde der Hauptverschiedenheiten der Häuerarbeiten", in der auch Ausführungen zur Gesteinsfestigkeit, die auf Härte, Zusammenhalt der Teile und Elastizität zurückgeführt wird, enthalten sind.

*Charles Augustin Coulomb* (1736 - 1806) hatte den Mangel bisheriger Theorienbildung im Bauwesen erkannt, der in einer Vernachlässigung des realen Tragverhaltens und in einer ungenügenden Beachtung der dafür verantwortlichen Materialeigenschaften bestand. Er versuchte durch Experimente wichtige und vor allem charakteristische Materialeigenschaften zu bestimmen. In der Erddrucktheorie stellte er Fließ- und Bruchbedingungen auf, über die er zu einem Plastizitätstheoretischen Ansatz gelangte, der noch heute in der Bodenmechanik Gültigkeit besitzt.

Dominierten bis ins Mittelalter Steine und Holz als Baustoffe (s. **Bilder 5.4 und 5.5**), so rückten im 18. und 19. Jahrhundert in zunehmendem Maß Eisenwerkstoffe in den Vordergrund. Gusseisen wurde im Brücken- und Kuppelbau (z. B. gusseiserne Rippenkuppel der Halle aux Blés in Paris, die zwischen 1809 und 1811 erbaut wurde) verwendet. Mit dem durch die Erfindung der Dampfmaschine durch *James Watt* (1736 - 1761) einsetzenden Aufschwung der Maschinentechnik nahm das Interesse zu, auch Festigkeitswerte von Eisenwerkstoffen, Buntmetallen und ihren Legierungen zu ermitteln. In diesem Zusammenhang sind vor allem Arbeiten von *Thomas Tredgold* (1788 - 1829), *Siméon-Denis Poisson* (1781 - 1840), *Thomas Young* (1773 - 1829), *Johann Albert Eytelwein* (1764 - 1848), *Louis Augustin Cauchy* (1789 - 1857), *Eaton Hodgkinson* (1789 - 1861) bis zu *August Wöhler* (1819 - 1914) zu nennen [5.15]. Von *Eytelwein* erschien 1808/09 ein dreibändiges Werk mit dem Titel "Handbuch der Statik fester Körper", mit dem im deutschsprachigen Raum ein gewisser Anschluss vor allem an englische und französische Autoren auf diesem Gebiet erreicht wurde. *Cau-*

chy schuf die Grundlagen der mathematischen Elastizitätstheorie und führte den allgemeinen Spannungsbegriff ein. *Hodgkinson* experimentierte mit guss- und schmiedeeisernen Profilträgern und Tragwerksformen und ermittelte Materialkoeffizienten, Bemessungsregeln und Verhältnisse von Spannungen und Dehnungen, die in viele Fachbücher seiner Zeit übernommen wurden. Darstellungen des Verhältnisses von Spannung und Dehnung für Flusstahl (Spannungs-Dehnungs-Diagramm) findet man beispielsweise in einem Buch von *Georg Christoph Mehrrens* (1843 - 1917) mit dem Titel "Eisen und Eisenkonstruktionen ...", das 1887 erschien. Solche Diagramme wurden in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zum zentralen Darstellungsmittel in der Festigkeitslehre.

Mit dem aufkommenden Eisenbahnwesen Mitte des 19. Jahrhunderts wurden weitere Impulse zur Erforschung des Festigkeitsverhaltens, besonders der Eisenwerkstoffe, geschaffen. Hier sind vor allem die von *Wöhler* vorgenommenen Dauerfestigkeitsprüfungen zu erwähnen auf deren Versuchsstrategie auch heutige Dauerfestigkeits-Prüfregime basieren.

Probleme der Dauerfestigkeit leiteten sich vor allem aus Brüchen an Eisenbahnachsen, Radreifen und Schienen ab. Bisherige Untersuchungen von Eisenwerkstoffen bezogen sich auf die Ermittlung der Bruchgrenze, die in einachsigen Zug- bzw. Druckversuchen bestimmt wurde. Der Ruf nach genormten Materialprüfverfahren und -werten verstärkte sich, wobei man sich auch Gedanken über Festigkeitswerte bei stoßartiger und wechselnder Belastung machte. *Hodgkinson* versuchte die Festigkeitstheorie dahingehend zu erweitern, dass er bleibende Verformungen bei wiederholten Belastungen einbezog. *John William Macquorn Rankine* (1820 - 1872) leitete aus Untersuchungen des Bruchverhaltens und dem Bruchverlauf wechselnd beanspruchter Proben und Bauteile Maßnahmen zur Verhinderung von Kerbwirkungen ab.

Nach langjährigen Experimenten zwischen 1858 und 1870 wurden vom preußischen Eisenbahnbeamten *August Wöhler* Probleme der Dauerfestigkeit und Materialprüfung auch ansatzweise theoretisch zu bewältigen versucht. Die Hysteresiserscheinung der Werkstoffe unter Wechsellasten, die später als "Wöhlerkurven" in die Festigkeitslehre eingingen, sind von ihm erkannt worden. Er gab auch das Verhältnis der Bruchspannungen bei ruhender, schwellender und wechselnder Belastung mit 3:2:1 an.

Die theoretische Behandlung des Dauerfestigkeitsverhaltens der Werkstoffe erforderte jedoch die Einbeziehung weiterer experimentell zu ermittelnder Werte in Form von Festigkeitskoeffizienten, Formzahlen und Materialkennwerten bei unterschiedlichen Belastungsregimen. Der große Bedarf an vor allem gesicherten Materialkennwerten bei den unterschiedlichsten Be-



anspruchungsformen förderte in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts die Errichtung von Materialprüfanstalten.

Die ersten Gründungen derartiger Anstalten wurden in München von *Johann Bauschinger* (1834 -1893), in Stuttgart von *Carl von Bach* (1847 - 1931) und in Zürich bzw. Wien von *Ludwig von Tetmajer* (1850 - 1905) vorgenommen. Als am besten ausgestattet galt die von *Adolf Martens* (1850 - 1914) geleitete Mechanisch-technische Versuchsanstalt an der TH Berlin, aus der dann 1904 das Materialprüfamt hervorging.

Internationale Konferenzen und das Bestreben von Wissenschaft, Industrie und Staat, verbindliche Materialprüfverfahren und -kennwerte zur Verfügung zu haben, führten einerseits zur Bildung von staatlichen Materialprüfanstalten und andererseits auch 1895 zur Gründung des Internationalen Verbands für Materialprüfung der Technik.

Die stürmische Entwicklung der Technik im 19. Jahrhundert bewirkte ein ebenso rasantes Vorwärtstreben der Technikwissenschaften. In dieser Zeit, die in den folgenden Abschnitten besonders behandelt werden soll, vollzog sich auch die Herausbildung der speziellen **Berechnungsverfahren für Federn**. *Carl von Bach*, der als anerkannter Theoretiker auf dem Gebiet der Festigkeit galt, hat diese Entwicklung durch theoretische und experimentelle Arbeiten wesentlich geprägt. In seinen in mehreren Auflagen bis ins 20. Jahrhundert erschienenen Werken "Die Maschinenelemente" und "Die Theorie der Elasticität und Festigkeit" werden eindrucksvoll der rasche Erkenntniszuwachs in der technischen Elastizitätslehre, die Entwicklung auf dem Gebiet der Maschinenelemente und der ständige Zuwachs von Materialkennwerten zur sicheren Dimensionierung der Bauteile widergespiegelt.

## **5.4 Die Bach'sche Ära der Festigkeitslehre und der Maschinenelemente**

### **5.4.1 Kennzeichnung der Technikentwicklung im 19. Jahrhundert**

Noch bis ins 19. Jahrhundert hinein war die Festigkeitslehre durch die Ansprüche geprägt, die von der Bautechnik gestellt wurden. Sie vermittelte in dieser Zeit hauptsächlich Balken- und Fachwerktheorie. Zahlreiche Arbeiten wurden durch bautechnische Probleme der Tragwerktechnik angeregt. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Beiträge von *Clapeyron*, *Culmann*, *Cremona*, *Gerber*, *Mohr* und *Ritter* zu nennen, deren Verfahren und

Berechnungsvorschriften noch heute in der Technischen Mechanik mit ihrem Namen verbunden sind.

Immer wieder regten dabei vor allem Fälle zu Lösungen an, die als “statisch unbestimmt” einzuordnen waren. Lösungsverfahren sind hier neben den bereits genannten Tragwerkstechnikern vor allem durch *Navier* und später durch *Carlo Alberto Castigliano* (1847 - 1884) eingeführt worden. Bedeutungsvoll für die Entwicklung der Federtheorie ist dabei die von *Castigliano* praktizierte Vorgehensweise, zur Behandlung elastizitätstheoretischer Zusammenhänge die Formänderungsarbeit heranzuziehen, mit der auch statisch unbestimmte Fälle lösbar waren. *Castigliano* wendet seine neue Theorie als erster zur Berechnung von Federn an und sorgt mit seinem Buch “Theorie der Biegungs- und Torsions-Federn” (1888 aus dem Italienischen übersetzt erschienen [5.16]) ausgangs des 19. Jahrhunderts für die **zweite geschlossene Darstellung der Berechnung von Federn** nach *F. Reuleaux*.

Die Entwicklung des Maschinenbaus, des Transportwesens (Eisenbahn, Schiff- und Automobilbau) und der Stahlindustrie im 19. Jahrhundert war mit Anforderungen an das Ingenieurwesen verbunden, die sich vor allem in der Frage nach ertragbaren Materialbeanspruchungen als Basis für Entwurfsberechnungen und in der gesamten Konstruktionstechnik stellten. In zahlreichen Lehrbüchern dieser Zeit, die die Fachgebiete Festigkeitslehre, Maschinen- und Bautechnik behandeln, ist das Bemühen zu erkennen, sowohl den Auszubildenden als auch den im Berufsleben stehenden praktikable Materialkennwerte zu vermitteln.

Ausgehend von den Erfordernissen der Bautechnik waren dies zunächst auf deutschsprachigem Gebiet *Johann Albert Eytelwein* (1764 - 1848), Direktor der 1799 gegründeten Bauakademie in Berlin, mit seinem 1808/09 erschienenen dreibändigen “Handbuch der Statik fester Körper”, *Franz Joseph Ritter von Gerstner* (1756 - 1832), Wasserbaudirektor und Professor in Prag mit der Herausgabe (1831 zusammen mit seinem Sohn *Franz Anton Gerstner* (1793 - 1840)) des “Handbuchs der Mechanik für Praktiker”, und später *Julius Weisbach* (1806 - 1871), Professor an der Bergakademie Freiberg, der mit seinem “Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinenmechanik” 1835 diese Bestrebungen auf den Maschinenbau ausdehnte. *Weisbach* gilt auch als Mitbegründer der “Allgemeinen Maschinenlehre”, die sich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts als selbständiges Wissens- und Lehrgebiet herausbildete und in der sowohl festigkeitstechnische, werkstofftechnische, maschinentechnische als auch konstruktive Grundlagen vermittelt wurden.

Mit dem aufkommenden Maschinenbau zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurden Ingenieure neben einfachen geometrisch-kinematischen Problemen vor allem mit Anforderungen zur Reibungsminderung, Dichtheit und Festigkeit der Materialien konfrontiert. Hier war es zunächst der Erfinder der

Dampfmaschine *James Watt* (1736 - 1819), der Richtwerte für die Dimensionierung wesentlicher Maschinenteile aufstellte, veröffentlichte und damit die Grundlage für die in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts vielseitig angewendete Methode der Verhältniszahlen legte. Das war ein verlässliches Verfahren, an dem sich Folgegenerationen von Maschinenbauern orientierten und dessen Grundlagen von den englischen Technikwissenschaftlern *Young*, *Tredgold* und *Robert Willis* (1800 - 1875) weiter vervollkommen wurden.

In Frankreich ist es *Jean Victor Poncelet* (1788 - 1867), der neben *Navier* und *Coriolis* als Begründer der Technischen Mechanik gilt, dem es als hervorragenden Lehrer an der *École Polytechnique* zu Paris gelang, polytechnische Bildungsmethoden in den Fächern angewandte Mechanik und Maschinenlehre einzuführen. In seinem alternierenden Unterricht zwischen Vorlesung, Repetitorien und experimentellen Übungen vermochte er Theorienbildung und Experiment bestens miteinander zu verbinden. Im Mittelpunkt der Experimente stand die Materialprüfung im Rahmen der Festigkeitslehre. Diese Verbindung und die Übermittlung von Versuchsergebnissen spiegelt sich auch in seinen Lehrbüchern wider. Auf *J. V. Poncelet* verweist *F. Reuleaux* in seinem Buch über die Berechnung und Konstruktion der wichtigsten Federn [5.152], das als *erstes deutschsprachiges Federnbuch* gilt (erschienen 1857).

In dieser Zeit werden in Deutschland, angeregt durch die in England und Frankreich erschienenen Lehrbücher, die verschiedensten Handbücher, Maschinenzyklopädien, Kompendien und Tafelwerke erarbeitet und herausgebracht, um dem Studierenden und dem tätigen Ingenieur neben theoretischen Herleitungen vor allem Konstruktionsregeln, praktische Handlungsweisen, verschiedene Faustregeln, Verhältniszahlen und tabellarische Übersichten wichtiger Koeffizienten von Materialien in die Hand zu geben. Zu den Autoren gehörten u. a. *Adolph Ferdinand Wenceslaus Brix* (1798 - 1870) und *Julius Ambrosius Hülse* (1812 - 1876) sowie *Ferdinand Redtenbacher* (1809 - 1863), der als Lehrer am Polytechnikum in Karlsruhe tätig war und als Begründer des wissenschaftlichen Maschinenbaus in Deutschland gilt. Der an der Bergakademie Freiberg und der TH Dresden lehrende *Gustav Zeuner* (1828 - 1907) trat als vielseitiger Professor für Mechanik und theoretische Maschinenlehre hervor, ehe er sich später auf die technische Thermodynamik konzentrierte [5.180]. *Hülse* verfasste eine "Allgemeine Maschinen-Encyclopädie", ein sehr umfangreiches Werk mit ausführlichen Beschreibungen der einzelnen Stichwort-Begriffe, das leider nach Erscheinen des zweiten Bandes 1844 mit den Buchstaben "B" und "C" abgebrochen wurde. Anzumerken ist, dass in diesem Werk bei der Be-

schreibung von Bremsdynamometern, Stahlfedern und Federn (Schraubenfedern) in Federwaagen erwähnt wurden [5.69].

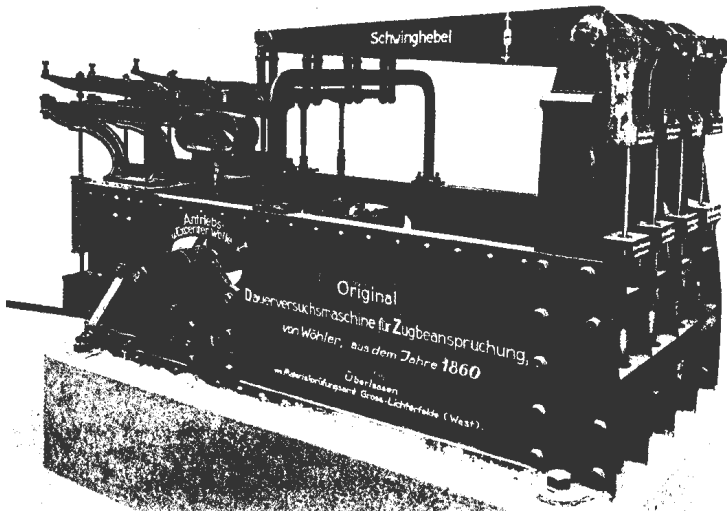
Der Bedarf an Werkstoffdaten für die Konstruktion der Maschinen nahm ständig zu. Nicht zuletzt wurde dieser Bedarf durch die immer wieder auftretenden Brüche von Maschinenteilen angeregt. Eine mangelhafte Beherrschung von Konstruktion und Werkstoff führten besonders beim Einsatz neuer Technik häufig zu Havarien. Betroffen war vor allem das noch junge Eisenbahnwesen. Rad- und Achsbrüche, in der Folge Zugentgleisungen, Kesselexplosionen und Brückeneinstürze, Unglücke, die nicht selten auch Menschenleben kosteten, forderten ab Mitte des 19. Jahrhunderts von der Festigkeitsforschung und der Materialprüfung besondere Leistungen.

An Hand dieser Beispiele kann das 19. Jahrhundert als Zeitraum der Entwicklung der Maschinentechnik und der Maschinenwissenschaften mit polytechnischen Lehrkonzepten, Erarbeitung zahlreicher Lehrbücher, in die in zunehmendem Maße Festigkeitswerte und konstruktionstheoretische Aspekte eingearbeitet wurden, der Entwicklung der Werkstoffe und der Materialprüftechnik, der Normung und vieler Bereiche der Fertigungstechnik (besonders der Werkzeugmaschinen) gekennzeichnet werden.

#### 5.4.2 Maschinenlehre und Konstruktionstechnik

Im Zuge der Entwicklung der Maschinentechnik ist im 19. Jahrhundert ein erheblicher Wissenszuwachs im Festigkeits- und Verformungsverhalten der Materialien, bei der Anwendung von Materialkennwerten in der Konstruktion sowie in der gesamten Fertigungstechnik zu verzeichnen. Das plastische Verhalten der Materialien rückte sowohl in der Festigkeitslehre als auch in der Werkstofftechnik immer mehr in den Vordergrund. Vor allem die Umformtechnik (Walzen, Biegen, Tiefziehen usw.) nutzte die Erkenntnisse der Plastizitätsmechanik.

Zu einer maßgeblichen Erweiterung der Kenntnisse über das reale Werkstoffverhalten führten die Mitte des 19. Jahrhunderts vom preußischen Eisenbahnbeamten *August Wöhler* (1819 - 1914) durchgeführten Dauerzugversuche, zu deren Durchführung eine spezielle Prüfeinrichtung (**Bild 5.11**) gebaut wurde [5.15][5.178]. Die Untersuchung der Dauerhaltbarkeit verschiedener Materialien beeinflusste sowohl die Theorienbildung in der Maschinenlehre (Festigkeitslehre, Werkstofflehre, Entwurf von Maschinenteilen, Konstruktionslehre) als auch die Vorgehensweise bei der Dimensionierung der Bauteile und der Normung von Stählen unter Einbeziehung ihrer konstruktiv-relevanten Eigenschaften.



**Bild 5.11:** Dauerversuchsmaschine von *A. Wöhler* aus dem Jahre 1860 [5.15]

Es ist das Verdienst von *Carl von Bach* (1847 - 1931), diese neuen Erkenntnisse gesammelt und in seinen Lehrbüchern “Theorie der Elasticität und Festigkeit” (1889) und “Die Maschinenelemente” (1881) der Fachwelt zur Nutzung zur Verfügung gestellt zu haben [5.3][5.5]. Die Lehre von *Bach* widerspiegelt eindrucksvoll den Erkenntniszuwachs in der technischen Elastizitätstheorie sowie der Konstruktionstechnik und bringt den hohen internationalen Rang der Maschinenwissenschaften in Deutschland zum Ausdruck. Dabei werden auch die vor ihm von *Franz Grashof* (1826 - 1893) in seinem Lehrbuch “Die Festigkeitslehre” (1866 und 1878) zusammengefassten Erkenntnisse der Festigkeitslehre eingearbeitet.

*Bach* fasste im Abschnitt “Elasticität und Festigkeit der Materialien” seines Lehrbuches “Die Maschinenelemente”, das mit Erscheinen der ersten Auflage 1881 als erstes Lehrbuch der Maschinenelemente dieser Art angesehen werden kann, die damaligen Erfahrungssätze zum Materialverhalten wie folgt zusammen:

1. Die Formänderung besteht aus einem elastischen und einem bleibenden Anteil.
2. Die durch eine bestimmte Belastung erzeugte Formänderung bedarf zu ihrer Ausbildung eine gewisse Zeit. Sie ist für eine elastische Änderung kurz, für eine bleibende kann sie aber recht lang sein. Bei der Entlastung bedarf es einer gewissen Zeit, bis der entlastete Körper seine elastischen Formänderungen wieder verliert.
3. Belastungen über die Elasticitätsgrenze hinaus verschieben diese, wie auch die Bruchgrenze, zu höheren Werten. Durch Ausglühen kann diese Veränderung der Werte wieder beseitigt werden.
4. Die Temperatur beeinflusst die Materialfestigkeit.
5. Plötzliche Querschnittsänderungen wirken sich nachteilig auf die Festigkeit aus. (Eine Erkenntnis, die später (1937) von *Heinz August Paul Neuber* (1906 - 1989) zur "Kerbspannungslehre" erweitert wurde.)

Das sind Leitsätze, die noch heute in der Federntechnik eine dominierende Rolle spielen, aber oft nicht in gebührender Weise beachtet werden.

Wesentliche Neuerungen in der Maschinen- und Konstruktionstechnik sind durch *Bach* in Form der *zulässigen Materialkennwerte* eingeführt worden. *Bach* wertet die Versuche von *Wöhler* umfassend aus und stellt im Abschnitt "Die Coefficienten der Elasticität und Festigkeit" erstmals in der Literatur der Maschinenteknik für die gebräuchlichsten Materialien des Maschinenbaus zulässige Werte der Anstrengung für Zug, Druck, Biegung, Schub und Drehung zusammen. **Bild 5.12** zeigt einen Ausschnitt aus dieser Tabelle. Neu ist auch die von *Bach* eingeführte und über Jahrzehnte in der Konstruktionstechnik praktizierte Einteilung der zulässigen Anstrengungen in drei Bereiche,

- I. Zulässige Anstrengungen für ruhende Belastung (ruhende Beanspruchung),
- II. Zulässige Anstrengungen für eine wechselnde Belastung mit Werten von Null bis zum Größtwert (Schwellbeanspruchung) und
- III. zulässige Anstrengungen für eine wechselnde Belastung, deren Werte zwischen einem größten negativen und einem größten positiven Wert liegen (Wechselbeanspruchung),



Schubspannung, der Differenz zwischen der größten und der kleinsten Normalspannung, eintritt. Durch Einbeziehen der mittleren Hauptspannung wurde von *Huber* und *Richard von Mises* (1913) die sogenannte “Gestaltänderungshypothese” entwickelt, die es ermöglichte, die für den Übergang vom elastischen zum plastischen Zustand eines metallischen Werkstücks maßgebenden Plastizitätsbedingungen für jeden Spannungszustand in Abhängigkeit von Werkstoff, Temperatur und Geschwindigkeit zu bestimmen [5.15]. Die Spannung, bei der das Metall zu fließen beginnt, wird heute als Umformfestigkeit bezeichnet.

Für die *Federntechnik* sind diese dargelegten theoretischen Zusammenhänge der Plastizitätsmechanik insofern von großer Bedeutung, als zur Herstellung der meisten Federn das Kaltumformen genutzt wird. Damit waren die wesentlichen Voraussetzungen geschaffen, um sowohl fertigungstechnische Probleme als auch die *Theorie für die Berechnung von Federn* eigenständig zu entwickeln, worauf im folgenden Abschnitt eingegangen werden soll, ohne die weitere Entwicklung des Umfeldes (Festigkeitslehre, Werkstofflehre, Fertigungstechnik) im einzelnen zu verfolgen. **Tafel 5.1** zeigt eine Übersicht über wesentliche wissenschaftliche Leistungen zur Entwicklung der Elastizitätslehre und der gesamten Festigkeitslehre, die die Voraussetzungen zur Entwicklung der *Federtheorie* bildeten.



**Tafel 5.1.** Chronologie zur Entwicklung der Mechanik und Festigkeitslehre [5.15][5.180]

Wesentliche Beiträge von:	Lebenszeitraum	Bedeutsame wissenschaftliche Leistungen zur Mechanik und Festigkeitslehre
<i>Archimedes</i>	287 - 212 v.d.Zt.	Kraftwirkungen am Hebel, Keil, Rolle; Auftrieb der Körper; Bau von Schleudern und Geschützen.
<i>Ktesibios</i>	um 250 v.d.Zt.	Hauptwerk: "Aufzeichnungen zur Mechanik" (verlorengegangen); Verschiedene Erfindungen der mechanischen Technik (Wasserorgel, Pumpen ...).
<i>Philon von Byzanz</i> (Schüler des <i>Ktesibios</i> )	um 200 v.d.Zt.	Belopoiika (Bücher zur Mechanik; nur teilweise erhalten bzw. überliefert); Aussagen über die Prüfung der Elastizität von Schwertern des <i>Ktesibios</i> .
<i>Leonardo da Vinci</i>	1452 - 1519	Zahlreiche technische Konstruktionen; Grundlagen zur Technischen Mechanik; Studien zum Biegeverhalten von Seilen und Drähten.
<i>Galileo Galilei</i>	1564 - 1642	Buch: Unterhaltung und Beweisführung über zwei neue Wissenschaftszweige, darunter Mechanik und Festigkeitslehre; Untersuchungen und Überlegungen über das elastische Verhalten von Materialien.
<i>Edmé Mariotte</i>	1620 - 1684	Erste Formulierung der Abhängigkeit von Biegespannung, Biegemoment und Stabquerschnitt; Stellte unabhängig von <i>Hooke</i> die Proportionalität zwischen Dehnung und Kraft fest.
<i>Christian Huygens</i>	1629 - 1695	Physiker und Mathematiker, erfand 1675 Federuhr mit Unruh.
<i>Robert Hooke</i>	1635 - 1703	Arbeiten über die Fähigkeit der Zustandwiederherstellung von Körpern, speziell Federn; Elastizitätsuntersuchungen an Federn; Formulierung des Gesetzes: <i>ut tensio sic vis</i> - wie die Ausdehnung so die Kraft; Begründer der Elastizitätslehre.
Sir Isaac <i>Newton</i>	1643 - 1727	Mathematiker und Naturwissenschaftler; Begründer der klassischen Physik und Mechanik; Formulierung der nach ihm benannten Axiome; Infinitesimalrechnung.
<i>Gottfried Wilhelm Leibniz</i>	1646 - 1716	Mathematiker und Physiker; Begründet mit <i>Newton</i> die Differential- und Integralrechnung.
<i>Pierre Varignon</i>	1654 - 1722	Formulierung des Zusammenhangs von Kraft- und Seileck (1687)
<i>Jakob Bernoulli</i> und <i>Johann Bernoulli</i>	1654 - 1705 1667 - 1748	Mathematiker und Physiker; Formulierten zahlreiche Lehrsätze der Mechanik und die Differentialgleichung der elastischen Linie von Balken; Lösung verschiedener Probleme der Biegetheorie.
<i>Jacob Leupold</i> <i>René-Antoine Ferchault de Reaumur</i> <i>Pieter van Musschenbroek</i>	1674 - 1727 1683 - 1757 1692 - 1761	Konstruktionsregeln und Dimensionierungsvorschriften. Prüfung der Härte von Stahl durch Ritzen. Festigkeitswerte von Baustoffen; Überlegungen zum Biege- und Knickverhalten von Bauteilen.
<i>Leonhard Euler</i>	1707 - 1783	Untersuchungen des Knickverhaltens von Stäben; Theorie der Stabknickung.
<i>Jean d'Alembert</i>	1717 - 1783	Formulierung von Prinzipien der Mechanik und Festigkeitslehre.
<i>Joseph Louis Lagrange</i>	1736 - 1813	In "Mécanique analytique" (1788) Zurückführung aller Probleme der Mechanik auf Gleichgewichtsaussagen (Fortsetzung der Arbeiten d'Alemberts).

<b>Wesentliche Beiträge von:</b>	<b>Lebenszeitraum</b>	<b>Bedeutsame wissenschaftliche Leistungen zur Mechanik und Festigkeitslehre</b>
<i>Charles Augustin Coulomb</i>	1736 - 1806	Zusammenfassung der wichtigsten Fälle der Festigkeitslehre (Essai sur une Appl., Paris 1776); Grundlegende Arbeiten zur Theorie der Reibung.
<i>Pierre Simon Laplace</i>	1749 – 1827	Mathematische Methoden zur Festigkeitslehre (Laplace-Transformation).
<i>Johann Albert Eytelwein</i>	1764 - 1848	Erste deutschsprachige zusammenfassende Publikationen der bisherigen Erkenntnisse der Mechanik und Festigkeitslehre (mit <i>Gerstner</i> ); Handbuch der Statik (1808); Versuche und Überlegungen zur Balkenbiegung und zur Kraftübertragung an Zugmittelgetrieben.
<i>Franz Joseph Ritter von Gerstner</i> und Sohn <i>Franz Anton Gerstner</i>	1756 - 1832 1793 - 1840	Handbuch der Mechanik (von Sohn <i>F. A. Gerstner</i> 1831 herausgegeben)
<i>Olinthus Gregory</i>	1774 - 1841	Einführung der Leibnizschen Differentialschreibweise in die Mechanik (Lehrbuch der Mechanik 1805).
<i>Thomas Young</i>	1773 - 1829	Erforschung des Widerstands elastischer Körper; Versuche zur Balkenbiegung; Proportionalitätsfaktor zwischen Spannung und Dehnung nach ihm "Young's modulus" benannt, später als Elastizitätsmodul in die Festigkeitslehre eingeführt.
<i>Thomas Tredgold</i>	1788 - 1829	Biegetheorie, Einführung der "neutralen Faser"; neben <i>Young</i> bedeutendster englischer Vertreter der Festigkeitslehre.
<i>Siméon-Denis Poisson</i>	1781 - 1840	Ausbau der theoretischen Mechanik; Untersuchungen zur Elastizität und Formänderung von Stäben (Poissonsche Zahl).
<i>Claude Louis Marie Henri Navier</i>	1785 - 1836	Bedeutende Arbeiten zur Theorie der Elastizitätslehre, Differentialgleichung der elastischen Linie von Biegebalken, Geradliniengesetz, Vollendet die Balkenbiege-Theorie; Statikansätze mit Berücksichtigung der Stabelastizität.
<i>Adhemar Jean Claude Barré de Saint-Venant</i> (Schüler von <i>Navier</i> )	1797 - 1886	Bedeutender Bauwissenschaftler des 19. Jahrh.; Vervollkommnung der Biegetheorie von <i>Navier</i> ; Bearbeitung von Torsionsproblemen; Plastizitätstheoretische Betrachtungen in der Baumechanik.
<i>Benoit Paul Émile Clapeyron</i>	1799 - 1864	Arbeiten zur Statik von Fachwerken.
<i>Julius Ludwig Weisbach</i>	1806 - 1871	Vollendet die Bergmaschinenlehre als Wissenschaft.
<i>Ferdinand Redtenbacher</i>	1809 - 1863	Entwicklung der Maschinenwissenschaften (Begründer des wissenschaftlichen Maschinenbaus); Buch: "Prizipien der Mechanik und des Maschinenbaus" 1852.
<i>Julius Ambrosius Hülse</i>	1812 - 1876	Herausgeber einer "Allgemeinen Maschinen-Encyclopädie" 1844 (nach Erscheinen des 2.Bandes Vorhaben abgebrochen).
<i>August Wöhler</i>	1819 - 1914	Anwendung von Schwingversuchen in der Werkstoffprüfung, Begründer der Dauerschwingprüfung.
<i>William John Macquorn Rankine</i>	1820 - 1872	Arbeiten zur Stabwerkstatik.
<i>Karl Culmann</i>	1821 - 1881	Grafostatische Analyse von Fachwerkträgern.
<i>Franz Grashof</i>	1826 - 1893	Lehrbuch "Festigkeitslehre" 1866 und 1878.
<i>Gustav Anton Zeuner</i>	1828 - 1907	Mechanik und theoretische Maschinenlehre.

<b>Wesentliche Beiträge von:</b>	<b>Lebenszeitraum</b>	<b>Bedeutende wissenschaftliche Leistungen zur Mechanik und Festigkeitslehre</b>
<i>Franz Reuleaux</i>	1829 - 1905	Maschinenwissenschaftler; Lehre von den Mechanismen und Getrieben; Begründer der wissenschaftlichen Getriebelehre; Theorie des Zwanglaufes. Erstes Buch über die Konstruktion und Berechnung der wichtigsten <b>Federn</b> , 1857 in Winterthur herausgegeben.
<i>Luigi Cremona</i>	1830 - 1903	Grafische und rechnerische Verfahren zur Stabwerkanalyse (Cremona-Plan).
<i>Heinrich Gottfried Gerber</i>	1832 - 1912	Stabwerkstatik, Gerberträger (Patent 1866)
<i>Johann Bauschinger</i>	1834 - 1893	Grundlegende Arbeiten zum elastischen und plastischen Materialverhalten.
<i>Otto Christian Mohr</i>	1835 - 1918	Grafische Lösungsverfahren für Stabwerkanalysen und Biegeträger; Lösungen für statisch unbestimmte Tragwerksysteme.
<i>Wilhelm Ritter</i>	1847 - 1906	Entwicklung und Anwendung rechnerischer und zeichnerischer Methoden in der Statik von Stabwerken (Rittersches Schnittverfahren).
<i>Carlo Alberto Castigliano</i>	1847 - 1884	Anwendung von Energieverfahren in der Festigkeitslehre und zur Lösung statisch unbestimmter Fälle; Erste geschlossene Abhandlung zur Berechnung von Federn ("Theorie der Biegungs- und Torsions-Federn") 1888.
<i>Carl von Bach</i>	1847 - 1931	Bedeutender Theoretiker und Praktiker der Festigkeitslehre und der Maschinenelemente; Bücher: "Theorie der Elastizität und Festigkeit" 1889 und "Die Maschinenelemente" 1881 (erstes Maschinenelemente-Lehrbuch in zahlreichen Auflagen).
<i>Johann August Brinell</i>	1849 - 1925	Härteprüfverfahren, Entwicklung zerstörungsfreier Materialprüfungen.
<i>Ludwig von Tetmajer</i>	1850 - 1905	Untersuchungen des elastischen und plastischen Materialverhaltens und des Knickstabproblems.
<i>Adolf Martens</i>	1850 - 1914	Entwicklung der Werkstoffprüftechnik, Aufbau der mechanisch-technischen Versuchsanstalt der TH Berlin - 1904 Materialprüfamt.
<i>August Föppl</i>	1854 - 1924	Bedeutender Theoretiker der Festigkeitslehre
<i>Karl Kutzbach</i>	1875 - 1942	Maschinenwissenschaftler; Maschinenelemente; Konstruktionssystematik; Moderne Entwurfsberechnungen auf der Basis der Vorstellungen von <i>Bach</i> und <i>Reuleaux</i> (Drehzahlplan nach <i>Kutzbach</i> ...).
<i>Richard Edler von Mises</i>	1883 - 1953	Festigkeitstheorien zusammen mit <i>Huber</i> und <i>Hencky</i> ; Hypothese der max. Gestaltänderungsarbeit.
<i>Ludwig Föppl</i> (Sohn von <i>A. Föppl</i> )	1887 - 1976	Entwicklung einer modernen, kontinuumsmechanisch orientierten Festigkeitstheorie; Buch: "Drang und Zwang" 1918 von <i>A. u. L. Föppl</i> .
<i>Cornelius Benjamin Biezeno</i>	1888 - 1975	Technische Mechanik, speziell Schwingungslehre; Buch <i>Biezeno/Grammel</i> : "Technische Dynamik".
<i>Richard Grammel</i>	1889 - 1964	Mechanik; Dynamische Probleme des Maschinenbaus, Eigenfrequenzen, Massenausgleich; Kerbspannungslehre. Statistische Analyse von Beanspruchungsvorgängen;
<i>Ernst Lehr</i>	1896 - 1944	Bedeutendstes Werk der Federtheorie zusammen mit <i>Siegfried Gross</i> 1938: "Die Federn".
<i>Heinz Neuber</i>	1906 - 1989	Begründer der ingenieurmäßigen Kerbspannungslehre; Buch 1934: "Kerbspannungslehre"

## 5.5 Zur Entwicklung der Federberechnung

### 5.5.1 Das Anliegen einer Federberechnung

Berechnungen zur Auslegung von Federn, die kurz auch als Federberechnungen bezeichnet werden, haben das Ziel, die geometrischen Parameter einer Feder so festzulegen, dass die Feder die geforderte Funktion, Zuverlässigkeit und Tragfähigkeit innerhalb der Baugruppe erfüllt, in der sie eingesetzt werden soll. Dabei sind sowohl federtheoretische, konstruktive, fertigungstechnische als auch werkstofftechnische und prüftechnische Belange und Bedingungen zu berücksichtigen. In die dabei anzuwendenden federtheoretischen Grundlagen fließen Erkenntnisse der Elastizitäts- und Festigkeitslehre ein, wobei vor allem die Modellbildung (Feder und Umgebung), die Modellbedingungen und Systemvoraussetzungen sowie eventuelle Einschränkungen bzw. Vernachlässigungen einzubeziehen sind. Schließlich sind beim Festigkeitsnachweis (bzw. Tragfähigkeitsnachweis) [5.122] [5.121] auch die Belastungsgrenzen (zulässige Spannungen) der Werkstoffe zu berücksichtigen.

Die Recherchen in der deutschsprachigen Literatur zu Beiträgen über Federn und ihre Berechnungen haben ergeben, dass wohl durch *Redtenbacher* 1855 [5.149] erstmals in einem Lehrbuch Federberechnungen dargelegt wurden. Sowohl *Redtenbacher* als auch nach ihm *Reuleaux* 1857 [5.152] verweisen auf französische Quellen (*J. V. Poncelet* [5.142] u. a.), die z. T. als Übersetzungen vorlagen. Behandelt werden etwa bis gegen 1900 Biegefedern (einfache und geschichtete Blattfedern), Schraubenfedern (zylindrische, kegel-, tonnen- und taillenförmige) und Spiralfedern. Erst im 20. Jahrhundert folgt die Berechnung für andere und z. T. neue Formen (z. B. Tellerfedern, Ringfeder). Schwerpunkte der Berechnungen bildeten die Verformung und die Federarbeit. Belastungsfragen widmet man sich stets im Rahmen des technischen Standes der Werkstoffentwicklung und der Tragfähigkeitsprüftechnik.

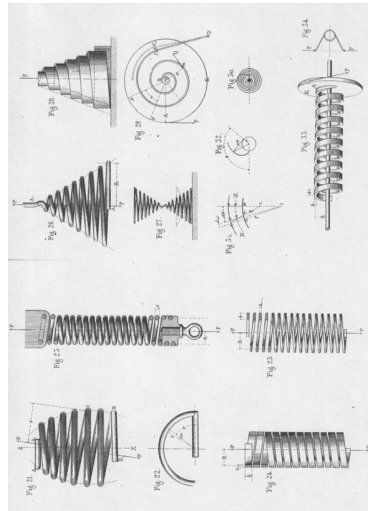
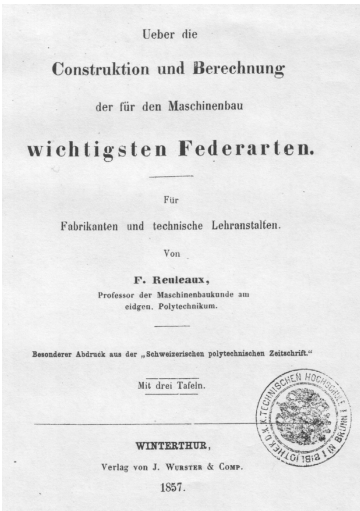
Dieser Einfluss des Entwicklungsstandes der Technik schlägt sich auch in den verschiedenen Büchern und Zeitschriften des 19. und 20. Jahrhunderts bei den Darlegungen zu Federn und ihren Berechnungen nieder, die bis in die 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts verfolgt wurden und über die in den folgenden Abschnitten an markanten Beispielen berichtet werden soll.

## 5.5.2 Vorgeschichte und die Ansätze von *Reuleaux* 1857

In den vorangehenden Abschnitten wurde gezeigt, dass im Verlauf des 19. Jahrhunderts die theoretischen Voraussetzungen auf dem Gebiet der Technischen Mechanik und der Festigkeitslehre einen Stand erreicht hatten, der auch eine Anwendung auf die Erfassung der Zusammenhänge von Kraft, Verformung und Spannungen bei den damals bekannten Federn ermöglichte. So werden zunächst vor allem in den Lehrbüchern zur Mechanik und Festigkeitslehre in dieser Zeit als Beispiele auch Berechnungsbeziehungen für Federn behandelt, die für die bekanntesten Formen und Arten (Blattfedern, Schraubenfeder, Spiralfedern) angegeben und erläutert werden. Als Beispiele seien hier die Lehrbücher von *J. V. Poncelet* [5.142], *F. Grashof* [5.39] und *C. Bach* [5.5] genannt.

Über Jahrzehnte, bis ins 20. Jahrhundert hinein, blieben in diesen Lehrbüchern die Federn im Bereich der Technischen Mechanik. Auch die ersten Auflagen der HÜTTE enthielten die Federn nicht unter dem Kapitel „Maschinenteile/Maschinenelemente“, sondern ebenfalls als Anwendungsbeispiele in der Elastizitätslehre. Von *Franz Reuleaux* (1829 – 1905), einem der bedeutendsten Maschinenwissenschaftlern des 19. Jahrhunderts (Prof. in Zürich und Berlin), wird bei seinen systematischen Betrachtungen (s. [5.151], S. 468) dazu ausgeführt, dass man die Federn dann, wenn ihre konstruktive Ausführung besprochen wird, den Maschinenteilen zuweisen kann. „Ihre Berechnung ist indessen so eng mit den Aufgaben der Festigkeitslehre verknüpft, dass sie sich auch in dieser fast erschöpfend behandeln lassen.“

Mit dem Buch „Über die Konstruktion und Berechnung der für den Maschinenbau wichtigsten Federarten“ von *Franz Reuleaux* [5.152], das 1857 erschien, werden erstmals in einer Monographie die Berechnungsbeziehungen für Blattfedern, Schraubenfedern und Spiralfedern unter Berücksichtigung konstruktiver und wirtschaftlicher Aspekte (Vergleich der Federarbeiten) zusammengestellt und ihr Entstehen erläutert. **Bild 5.13** zeigt das Titelblatt dieses Buches und eine Seite der Abbildungen der im Buch behandelten Schrauben- und Spiralfedern.



**Bild 5.13:** Titelblatt und Bildseite des ersten Federnbuches von *F. Reuleaux* 1857 [5.152]

Für einfache Blattfedern werden die Grundbeziehungen (Kraft-Federweg-Abhängigkeiten, Spannungsbeziehungen) angegeben und die Vorteile diskutiert, die mit Blattfederformen erreicht werden, die von der Grundform mit konstantem Querschnitt über der Federlänge abweichen (Dreieckfeder, Parabelfeder, Feder mit kubischer Parabelform). Bei der Behandlung zusammengesetzter Blattfedern (geschichtete Blattfeder, Bündelblattfedern) wird von *Reuleaux* angemerkt, dass diese Federn bereits von *J. F. Redtenbacher* in seinem Buch „Die Gesetze des Locomotivbaus“ (Mannheim, 1855) [5.149] behandelt werden. Aber *Reuleaux* verwendet z. T. einfachere Beziehungen. Von *Reuleaux* wird die „Biegsamkeit“ als Verhältnis von Durchbiegung  $f$  und Federlänge  $l$  eingeführt. Auch wird schon ein sogenanntes „Güteverhältnis“ verwendet und diskutiert, das dann später von *Gerolsky* [5.33] und *Gross* [5.41] als „Artnutzwert“ für alle Federn abgeleitet und angegeben wird.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass *F. Redtenbacher* für die Berechnung der Blattfederwerke, wie **Bild 5.14** zeigt, von anderen Federmodell-Ansätzen ausgeht, die auch nicht mit denen von *Phillip* (bei *Redtenbacher* und *Reuleaux* zitiert) übereinstimmen. Das von *Redtenbacher* benutzte

Modell der Blattfederabstützung besitzt, bedingt durch die besondere Form der einzelnen Federblätter (von ihm als Schienen bezeichnet) Abstützstellen, an denen man sich die Wirkung von Einzelkräften vorstellen kann. Ein ähnliches Modell wird viel später auch von *E. Unbehaun* [5.185][5.184] zur Berechnung von Blattfederschaltern in Relais verwendet. Auf Grund dieser verschiedenen Modell-Ansätze sind in einigen Publikationen Diskussionen entfacht worden, wobei immer wieder auf „Berechnungsfehler“ hingewiesen wurde.

**DIE GESETZE**  
DES  
**LOKOMOTIV-BAUES**

von  
**F. Redtenbacher,**

Hörsaberglich Reallicher Hofrath und Professor an der polytechnischen Schule zu Orlitzsch.



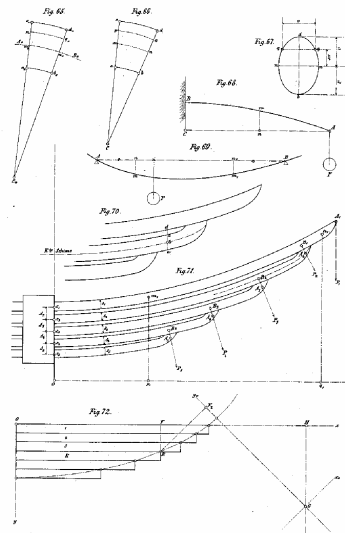
Mit 16 lithographirten Figurentafeln.



München:

Verlag von Friedrich Bassermann.

1825.



**Bild 5.14:** Titelblatt und Bildseite des Konstruktionsbuches von *F. Redtenbacher* [5.149]

Zu den Schraubenfedern führt *F. Reuleaux* aus, dass sie bisher in den Lehrbüchern der Mechanik nicht behandelt werden (bei *F. Grashof* [5.5] erst etwa 10 Jahre später). Bei den Berechnungsbeziehungen bezieht er sich auf *J. V. Poncelet* [5.142] (*Poncelet* war Prof. für Mathematik und Mechanik an der École Polytechnique in Paris und der Artillerieschule in Metz) und vereinfacht auch diese Berechnungsgrundlagen. Die Änderung des Windungsdurchmessers bei der Verformung in axialer Richtung wird bereits erkannt. Für alle behandelten Federn wird der Materialaufwand für vergleichbare

Belastungen ermittelt und diskutiert. Beispielsweise wird ein Vergleich zwischen Schraubendruckfedern und Blattfederwerken (geschichtete Blattfedern) durchgeführt und festgestellt, dass der Materialeinsatz bei Schraubendruckfedern nur 27% des für Blattfederwerke zutreffenden Wertes beträgt.

Für die Berechnung von Spiralfedern werden keine Quellen angegeben. Es ist aber anzunehmen, dass in Abhandlungen zur Uhrentechnik schon Ansätze vorliegen könnten, die aber nicht herangezogen wurden. In diesem Abschnitt behandelt *Reuleaux* alle Federn, deren Aufgabe darin besteht, eine Achsdrehung zu bewerkstelligen. Neben Spiralfedern (ebene Spirale), die in Uhren als Antriebsfedern (Aufzugfedern) oder Unruhfedern eingesetzt werden, sind es auch Schraubenfedern aus Draht, die von *Reuleaux* als Drehschraubenfedern (s. Bild 5.13, Fig. 33) bezeichnet werden (heutiger Begriff: Drehfeder, Schenkelfeder).

Von *F. Reuleaux* werden erstmals im deutschsprachigen Raum Berechnungsbeziehungen und Konstruktionshinweise für die damals wichtigsten Federn in einem Buch zusammengestellt. Zu dieser Aussage gelangt man, weil sowohl von *Reuleaux* als auch von *Redtenbacher* auf französische Quellen verwiesen wird. Das Entstehen dieser Berechnungsbeziehungen wird ausführlich erläutert. Neben zahlreichen Berechnungsbeispielen werden immer wieder Vergleiche zwischen den einzelnen Federarten angestellt, wobei der Materialaufwand im Mittelpunkt steht. Es wird allerdings auch vermerkt, dass einige ebenfalls verbreitete Federn, wie die Kreis- oder Ringfeder (Kolbenringe an Dampfmaschinen) oder die Adam'sche Bogenfeder nicht behandelt werden. Auch auf Federschwingungen konnte nicht eingegangen werden.

### 5.5.3 Die Arbeiten von *Grashof* und *Bach*

Von *Franz Grashof* werden in seinem 1866 in der 1. Auflage erschienenen Buch „Die Festigkeitslehre ...“ [5.39] und den weiteren Auflagen Ableitungen für die Berechnung der Verformungen aus den jeweiligen Beanspruchungen von Blattfedern sowie von Spiralfedern (von *Grashof* verwendete Bezeichnung der Schraubenfedern) vorgenommen, wobei exakt auf die Voraussetzungen eingegangen wird, unter denen die gewonnenen Beziehungen gelten. So setzt *Grashof* beispielsweise für die Berechnung der Verformung einer Schraubenfeder in Achsrichtung alle Spannungsanteile (Verformungsanteile), also Verdrehung, Biegung, Schub und Zug/Druck, an und weist dann nach, welche Anteile vernachlässigbar sind. Auch wird von ihm das Ausweichen des Kraftangriffspunktes infolge der Seitenkräfte bei



fehlender oder „fehlerhafter“ Führung des Federendes erkannt und demzufolge zwischen einem geführten und einem nicht geführten Kraftangriff unterschieden. Die unter Vernachlässigung der erkannten geringfügigen Einflüsse gefundenen Beziehungen für die Verformung der genannten Federn stimmen mit den von *Reuleaux* [5.152] angegebenen überein. Als Beispiele werden einfache und geschichtete Blattfedern, Dreieckfedern, Parabelfedern und Spiralfedern (Schraubenfedern) behandelt.

In ähnlicher Weise geht *Carl Bach* vor. Auch er behandelt die Federn sowohl in seinem 1889 erschienenem Buch „Elasticitäts- und Festigkeit“ [5.5] als auch in seinem Lehrbuch „Die Maschinenelemente ...“ (ab der 2. Auflage 1891) [5.3] in den Abschnitten zur Elastizität und Festigkeit. Unter dem Abschnitt „Stabförmige Körper mit gekrümmter Mittellinie“ werden gewundene Drehungsfedern (zylindrische Schraubenfedern und Kegelfedern) aus Draht mit rundem, quadratischem und rechteckförmigem Querschnitt behandelt. Im Kapitel „Biegung“ sind in allgemeiner Form die Biegefedern enthalten.

Auch in dem vom Verein „Die Hütte“ in der 4. Auflage 1862 herausgegebenen „Ingenieur Taschenbuch“ [5.71] sind Federn nicht im 5. Abschnitt „Maschinenteile“ aufgenommen worden, sondern sie erscheinen, und das ist besonders hervorzuheben, als extra ausgewiesene Gruppe am Ende des 3. Abschnitts „Elasticität und Festigkeit“. Es werden einfache Blattfedern, zusammengesetzte Blattfedern, Schraubenfedern (zylindrisch, kegelförmig, aus Draht und Federband) sowie Spiralfedern behandelt. Die Berechnungsbeziehungen werden übersichtlich in Tabellenform zusammengestellt.

#### 5.5.4 Weiterentwicklung der Federberechnungen 1888 durch *Castigliano*

*Franz Reuleaux* war bestrebt, für die Berechnung der Federn recht einfache Beziehungen zu finden. Diesen Grundsatz verfolgt auch *Carlo Alberto Castigliano* (1847 – 1884) in seinem Buch „Theorie der Biegungs- und Torsions-Federn“ [5.16]. Es erschien 1888 nach seinem Tod in einer Übersetzung aus dem Italienischen von *Richard Totz*. *Castigliano* war bemüht, für die Berechnung der Federn praktisch genügend einfache Formeln zu entwickeln. In diesem zweiten Federnbuch nach *Reuleaux*, das sich ausschließlich mit der Ableitung und Zusammenstellung der Berechnungsbeziehungen zur Bestimmung der Federgestalt-Parameter befasst, wendet *A. Castigliano* das von ihm vorher entwickelte und 1879 publizierte und nach ihm benannte Minimalprinzip der Statik an (*Castigliano-Prinzip*: Prinzip der

kleinsten elastischen Spannungen <sup>1)</sup>; Satz des Castigliano). Das Titelblatt und eine Seite der Abbildungen zeigt **Bild 5.15**. Die dargestellten Abbildungen aus diesem Buch geben gleichzeitig einen Überblick über die in diesem Buch behandelten Federarten. In einem speziellen Kapitel werden auch Stöße auf Federn und Kontaktprobleme bei geschichteten Blattfedern besprochen, wobei auch die bei der Auswertung von Publikationen festgestellte Fehler besprochen und korrigiert werden.

**Theorie**  
der  
**Biegungs- und Torsions-Federn**

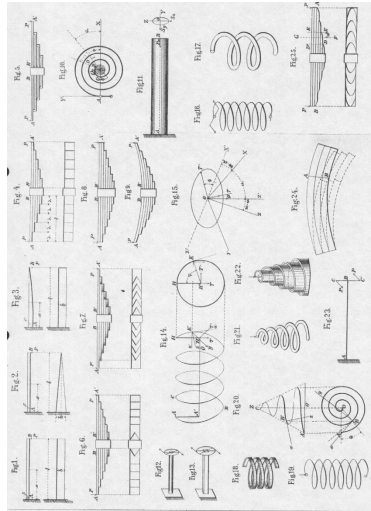
VON  
**A. Castigliano**  
Ingenieur der ober-italienischen Staatsbahn.

Aus dem Italienischen Uebersetzt von

**Richard Totz**  
Ingenieur.

Mit einer Tafel.

Wien.  
Druck und Verlag von Carl Gerold's Sohn.  
1888.



**Bild 5.15:** Titelblatt und Bilderseite aus dem Federnbuch von *A. Castigliano* 1888 [5.16]

<sup>1)</sup> **Castigliano-Prinzip:** Es besagt, dass sich in einem in Ruhe befindlichen, unter Einwirkung von Kräften elastisch deformierten Körper diejenigen elastischen Spannungen ausbilden, die die kleinste, im Körper gespeicherte Formänderungsarbeit zur Folge haben. (s.: *Théorie de l'équilibre des systèmes élastiques et ses applications*, Turin 1880)

### 5.5.5 Von *Castigliano* bis *Gerolsky* – Publikationen zu Federproblemen (1888 – 1918)

Ab 1857 wurde vom gerade gegründeten Verein der Deutschen Ingenieure (VDI) eine Zeitschrift herausgegeben, in der vor allem ingenieurtechnische Probleme und Anregungen publiziert wurden. In den ersten Jahrzehnten der Herausgabe dieser Zeitschrift (VDI-Zeitschrift) wurden vorwiegend Themen aus dem Maschinenwesen (Dampfmaschinen, Dampfkessel, Pumpen, Ventile), dem Ingenieur-Bauwesen (Brücken- und Kanalbau) und dem Eisenbahnwesen veröffentlicht. Das Maschinenelement „Feder“ taucht in diesen ersten Jahren des Bestehens dieser Zeitschrift nicht auf. Allerdings enthalten viele in Konstruktionszeichnungen dargestellte Maschinenbaugruppen Federn, vor allem Schraubenfedern [5.7], für die es auch, beispielsweise bei Kupplungen, verschiedene Patentanmeldungen gab [PAT1][PAT2][PAT3]. Daneben gab es auch eine Reihe Patentanmeldungen über verschiedene Sonderformen von Federn [PAT4][PAT5][PAT6], über die in Zeitschriften berichtet wurde.

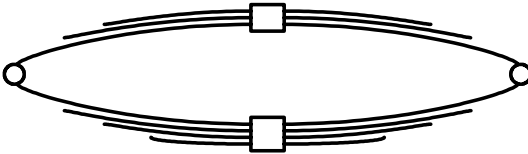
Erst mit fortschreitender Entwicklung des Maschinenwesens, der Eisenbahn und der Herausbildung des Kraftfahrzeugwesens gegen Ende des 19. Jahrhunderts (Bau des ersten Autos durch *Karl Friedrich Benz* (1844 – 1929) im Jahr 1886) wurde das Interesse geweckt, auch Probleme der Federn, vor allem der Schraubenfedern, darzustellen und neue Berechnungen darzulegen.

Bis Ende des 19. Jahrhunderts findet man in den ingenieurtechnischen Zeitschriften (z. B. VDI-Zeitschrift) nur vereinzelt Beiträge über die Berechnung von Federn. So haben beispielsweise die Arbeiten von *Castigliano* mehrere Wissenschaftler angeregt, unabhängig von diesem, das *Castigliano-Prinzip* auf die Berechnung von Tragwerken und auch von Federn anzuwenden. Hier sind vor allem die Arbeiten von *R. Krohn* [5.90], der in seinen Ausführungen wiederum auf einen Beitrag von Prof. Dr. *Fränkel* verweist (der 1882 in der Zeitschrift des Arch.- und Ing.-Vereins Hannover erschienen war) und die Arbeiten von *Heinrich F. B. Müller-Breslau* [5.131] zu nennen, der auch zwei Beispiele zu Federn enthält.

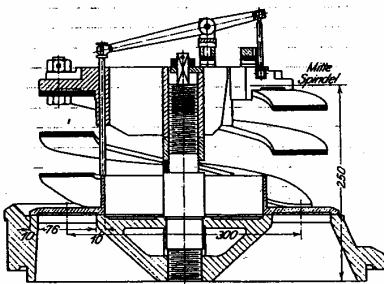
Zahlreiche Probleme mit Federn offenbarten sich im Zuge ihres vielfältigen Einsatzes im Eisenbahnwesen, im Motoren- und Dampfmaschinenbau (Ventilsteuerungen) und im Kraftfahrzeugwesen. Über die Lösung dieser Probleme wurde Ende des 19. Jahrhunderts u. a. in der VDI-Zeitschrift berichtet. Es handelte sich dabei meist um Angelegenheiten, die in der damaligen Literatur über Federn [5.152][5.149] noch nicht oder nicht ausrei-

chend behandelt wurden. Beispielsweise wurde bei der Ursachenuntersuchung für das Entgleisen von Güterwaggons festgestellt, dass die Tragfedern dieser Waggons (geschichtete Blattfedern) im unbelasteten Zustand der Waggons infolge ihrer zu großen „Federhärte“ (Federsteife) keine sichere Schienenhaftung der Räder bewirkten. Von *G. Lenz* [5.101] wurde dieser Umstand erkannt. Er schlug den Einsatz einer Doppeltragfeder vor [PAT5]. Durch dieses Federsystem, das in **Bild 5.16** prinzipiell dargestellt ist, wurde bei gleicher Traglast die Gesamtfedersteife verringert (Feder-Reihenschaltung).

Eine Reihe von Arbeiten beschäftigten sich mit der Berechnung und Konstruktion von Federn für Ventile [5.183][5.130][5.159][5.160]. Ein Beispiel zeigt **Bild 5.17**. In diesem Zusammenhang sind auch erste dynamische Betrachtungen, besonders von *P. Fröhlich* [5.28] und *J. Magg* [5.110], an Schraubenfedern angestellt worden. Von *Fröhlich* wurden Differentialgleichungen für das Schwingungsverhalten von Schraubenfedern aufgestellt und gelöst, Eigenschwingungen gemessen und Federdämpfungen untersucht.



**Bild 5.16:** Prinzipielle Darstellung der Doppel-Tragfeder nach [5.101]



**Bild 5.17:** Ventilfeder (gewundene Blattfeder) in einem Ringventil [5.160]

Neben vielen weiteren Arbeiten zur Berechnung von Schraubenfedern [5.197][5.170][5.129] sind Anfang des 20. Jahrhunderts auch Probleme der seitlichen Verformung rotierender Schraubenfedern [5.106][5.182][5.156] und des Ausknickens [5.70] behandelt worden. Auch graphische Hilfsmittel zur Federberechnung sind bereits entwickelt worden [5.144][5.24].

Wenn auch Publikationen zu Federn in ingenieurtechnischen Zeitschriften des 19. Jahrhunderts noch selten zu finden sind, so deuten doch die vorhandenen Beiträge darauf hin, dass Federn sowohl in der ingenieurtechnischen Ausbildung als auch als wissenschaftliches Arbeitsgebiet eine beachtenswerte Rolle spielten. Federn wurden als Bauteile mit besonderen elastischen Eigenschaften in der Elastizitätslehre behandelt, wie es die Lehrbücher von *Grashof* [5.39] und *Bach* [5.3][5.5] zeigen. Auch ein Vortrag von Prof. Dr. phil. **Rudolf Kirsch** (1841 – 1901) vor dem Bezirksverein Chemnitz des VDI 1897 [5.79] mit dem Thema „Die Theorie der Federn“ zeigt ebenfalls, dass man sich im Rahmen der Technischen Mechanik/Elastizitätslehre (*Kirsch* war kgl. sächsischer Regierungsrat und Professor an der Gewerbeakademie zu Chemnitz; Fächer: Mechanik, Mathematik, Physik) sehr wohl und auch sehr umfassend mit Federn beschäftigte. In seinem Vortrag werden von ihm die Verformungsbeziehungen einer Reihe von Federn behandelt, darunter Dehnungsfedern (Zugstabfedern), Biegungsfedern (rechteckförmige Blattfeder, Dreieckfeder, Spiralfeder) und Drehungs- bzw. Torsionsfedern (gerader Drehstab, zyl. Schraubenfedern, Kegel-, Tonnen- und Taillenfedern). Als Maschinenelement tauchen Federn in der Lehre allerdings erst in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts auf.

Im Jahr 1918 verfasste *W. Gerolsky*, 30 Jahre nach der Veröffentlichung des Federnbuches von *A. Castigliano* [5.16], ein Buch über die Berechnung der Biegungs- und Torsionsfedern [5.33], wobei er bemüht war, die bisherigen Veröffentlichungen der letzten Jahre auf diesem Gebiet einzuarbeiten. In diesem Buch findet man zum ersten Mal ein ausführliches Quellenverzeichnis. Sein Anliegen war es vor allem, dem gewachsenen Bedarf an Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen für Federn nachzukommen, der sich aus der stürmischen Entwicklung, insbesondere der Kraftmaschinen- und Fahrzeugtechnik, ergeben hatte. Bemerkenswert sind seine Ausführungen zum wirtschaftlichen Einsatz der verschiedenen Federarten. Zum Vergleich der Federn untereinander wird das spezifische Arbeitsvermögen der Federn auf das Arbeitsvermögen eines Zugstabes bezogen. Dieses Verhältnis wird später von *S. Gross* [5.41] als Artnutzwert bezeichnet. Derartige Betrachtungen sind auch schon von *Reuleaux* in seinem Federnbuch 1857 angestellt worden [5.152]. **Bild 5.18** zeigt die Tafel mit den einzelnen „Artnutzwerten“ der Federn aus [5.33].

# Die Berechnung der Biegungs- und Torsionsfedern.

Bearbeitet von

Ingenieur W. Gerolsky.

Mit 47 Abbildungen und 44 Tabellen.



Frankfurt a. M.-West  
Akademisch-Technischer Verlag  
Johann Hammel

1918.

18

4 Zusammenstellung  
 der spezifischen Arbeitsvermögen „ $A_v$ “ und Materialausnutzungsverhältnisse „ $\eta$ “ für verschiedene Federarten.

Biegungsfedern.	Fig.	$A_v$	$\eta$
<b>1. Gerade Biegungsfedern.</b>			
Rechteckfeder	7	$\frac{kb^2}{18 E}$	1 : 9
Dreieckfeder	10	$\frac{kb^2}{6 E}$	1 : 3
Rechteckfeder, nach der kubischen Parabel zugespitzt	12	$\frac{kb^2}{9 E}$	1 : 4,5
<b>2. Zusammengesetzte Biegungsfedern.</b>			
Dreieckschichtfeder	16	$\frac{kb^2}{6 E}$	1 : 3
Trapezfeder mit Zuschärfung	30	$\frac{kb^2}{6 E}$	1 : 3
Rechteckschichtfeder, nach der kubischen Parabel zugespitzt	21	$\frac{kb^2}{6 E}$	1 : 3
<b>3. Gewundene Biegungsfedern.</b>			
Spiralfeder mit rechteckigem Querschnitt	22	$\frac{kb^2}{6 E}$	1 : 3
Spiralfeder mit kreisförmigem Querschnitt	22	$\frac{kb^2}{8 E}$	1 : 4
Schraubenfeder mit rechteckigem Querschnitt	23	$\frac{kb^2}{6 E}$	1 : 3
Schraubenfeder mit kreisförmigem Querschnitt	24	$\frac{kb^2}{8 E}$	1 : 4
<b>Drehungsfedern.</b>			
<b>1. Gerade Drehungsfedern.</b>			
Gerade Drehungsfeder mit kreisförmigem Querschnitt	26	$\frac{kd^2}{4 G}$	1 : 2
Gerade Drehungsfeder mit rechteckigem Querschnitt	27	$\frac{4}{45} (\xi^2 + 1) \frac{kd^2}{G}$	je nach $\xi$
Gerade Drehungsfeder mit ringförmigem Querschnitt	28	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{d_i}{d_a} \right)^2 \frac{kd^2}{2G}$	je nach $\frac{d_i}{d_a}$
<b>2. Gewundene Drehungsfedern.</b>			
Cylindrische Schraubenfeder mit kreisförmigem Querschnitt	29 33	$\frac{kd^2}{4 G}$	1 : 2
Cylindrische Schraubenfeder mit quadratischem Querschnitt	41	$\frac{8}{45} \frac{kd^2}{G}$	1 : 2,81
Cylindrische Schraubenfeder mit rechteckigem Querschnitt	43 44	$\frac{4}{45} (\xi^2 + 1) \frac{kd^2}{G}$	*) je nach $\xi$
Kegelfeder mit kreisförmigem Querschnitt	45	$\frac{kd^2}{8 G}$	1 : 4
Kegelmufffeder mit kreisförmigem Querschnitt	46	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \frac{kd^2}{4 G}$	je nach $\frac{r_0}{r}$
Kegelmufffeder mit rechteckigem Querschnitt	47	$\frac{2}{45} (\xi^2 + 1) \frac{kd^2}{G}$	*) je nach $\xi$

$$\xi = \frac{b}{h} = \text{Seitenverhältnis des Querschnittes.}$$

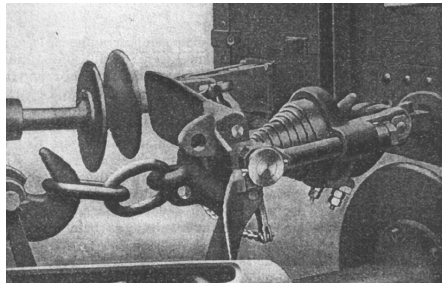
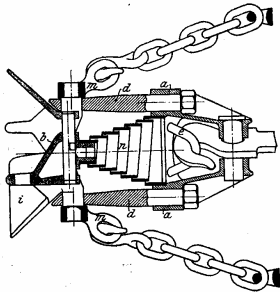
\*) Siehe Fußnote auf Seite 112.

**Bild 5.18:** Titelblatt des Buches von Gerolsky und Tafel der „Artnutzwerte“ der Federn [5.33]

### 5.5.6 Neue Federarten, ihre Berechnung und die Weiterentwicklung der Berechnung von Schraubenfedern Anfang des 20. Jahrhunderts

Während die im 19. Jahrhundert erschienen Lehrbücher des Maschinenwesens, der Elastizitätslehre und die beiden Federbücher vorwiegend nur Biegefedern, Schraubenfedern und Spiralfedern behandelten, wendet man sich zu Beginn des 20. Jahrhunderts auch der theoretischen Behandlung neuer Federformen und Federarten zu.

Bereits 1844 wurde von *Baille* eine aus Bandstahl gefertigte, schraubenförmig gewickelte Kegelstumpffeder erfunden (s. Bild 5.13, Fig. 28 und Bild 5.15, Fig. 22), für die es bislang keine Berechnungsbeziehungen gab. Sie wurde vorwiegend als Pufferfeder in Eisenbahnwaggons eingesetzt und deshalb (in der damaligen Schreibweise) als „Bufferspirale“ oder Evolutfeder bezeichnet. **Bild 5.19** zeigt eine derartige Feder an der Kupplung eines Eisenbahnwagens. In allen Federbüchern von *Reuleaux* an ist sie enthalten. *Castigliano* [5.16] leitet für Spiralfedern geometrische Beziehungen her, die man auch auf diese Federart anwenden könnte. Doch praktikable Dimensionierungsgleichungen werden für diese Federart nicht angeben.



**Bild 5.19:** Kegelfeder aus Federband in einer Eisenbahnwagen-Kupplung [5.50]

*V. Meyer* [5.123] versucht ebenfalls, die noch fehlenden Berechnungsbeziehungen zu erstellen. Von ihm werden eine Reihe geometrischer Beziehungen eingeführt, für die er auch Näherungen angibt und Beispiele rechnet. Jedoch wird 1918 von *Gerolsky* [5.33] im Ergebnis einer recht guten Literaturrecherche festgestellt, dass es bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht gelungen ist, Berechnungsbeziehungen für Kegelstumpffedern aus Federband



aufzustellen, die die gewünschten praktischen Funktionswerte erfüllen. Er verweist deshalb auf die Erfahrungen der Federhersteller und empfiehlt die Nutzung von Datenlisten für Kegelstumpffedern, beispielsweise der Westfälischen Stahlwerke zu Bochum. So finden sich erst in später erschienenen Federbüchern von *Gross* [5.41] und *Wahl* [5.186] praktikable Berechnungsbeziehungen für diese Feder.

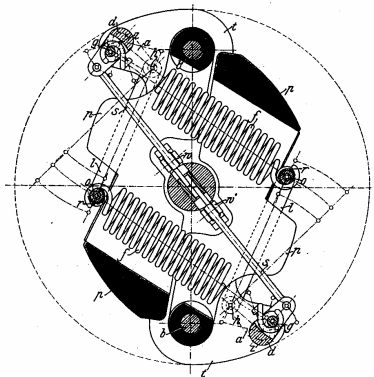
Es ist nicht bekannt, weshalb die Ansätze nach *V. Meyer* von *Gerolsky* nicht verwertet werden, obwohl sie als Literaturstelle zitiert waren. Vermutlich schätzte *Gerolsky* die Ergebnisse der Berechnungen als zu ungenau ein. Heutige Vergleichsrechnungen mit den Beziehungen nach [5.41] und [5.186] ergaben im Vergleich zu *Meyer* fast übereinstimmende Werte. Allerdings sind alle diese Beziehungen Näherungen.

Auf eine französische Erfindung geht neben der erwähnten Kegelstumpffeder auch die Tellerfeder zurück. 1861 wurde *Julien-Francois Belleville* ein Patent (französische Patent-Nr. 52399) über eine besondere Feder erteilt, die die Gestalt einer kegelförmigen Ringschale hatte und bei verhältnismäßig kleinem Federweg sehr große axiale Kräfte aufnehmen konnte. Im angelsächsischen Raum war sie als Belleville-Feder weit verbreitet. Die „Einzelteller“ dieser Federart lassen sich gleich- oder wechselsinnig schichten und so zu Säulen anordnen. Auch ist ein Anbringen radialer Schlitze von innen als auch von außen her möglich. Durch solche konstruktiven Veränderungen lassen sich die Federungseigenschaften an spezielle Anforderungen anpassen.

Lange Jahre existierten für diese Feder keine Berechnungsbeziehungen. Zwar gab es theoretische Arbeiten zur Behandlung ebener, gelochter Platten, aber für Kegelschalen gab es keine Unterlagen. Erst 1917 wurde von *Fr. Dubios* im Rahmen einer Dissertationsarbeit an der ETH Zürich mit dem Thema „Die Berechnung konischer Schalen“ eine Theorie entwickelt, die man zur Herleitung geeigneter Berechnungsbeziehungen für Tellerfedern nutzen konnte. Diese Theorie wurde dann auch 1936 von *I. O. Almen* und *A. Laszlo* [5.1] für die Entwicklung von Berechnungsgrundlagen für Tellerfedern genutzt [5.192]. Diese Arbeiten bilden auch heute noch die Grundlage für die Ausführungen zur Auslegung dieser Federn in allen Federbüchern [5.41][5.186][5.122] [5.121] und in den Firmenschriften [5.126][5.17]. Auch die auf einem Patent von Dr. *Werner Röhrs* basierende Schraubentellerfeder (s. Bild 4.2) gehört als jüngste Federneuheit zu dieser Federart [5.34].

Mit der Erfindung der Ringfeder durch *E. Kreissig* 1920 (DRP 358328) [5.86] tauchte eine völlig neue Federart auf, bei der als Werkstoffbeanspruchung Zug- und Druckspannungen auftraten. Es handelte sich dabei um eine Feder, die aus wechselseitig geschichteten innen bzw. außen doppelkegel-

förmigen Ringen bestand. Diese Feder wurde wegen der guten „inneren“ Dämpfung, wie die Kegelfeder nach *Baille*, vorwiegend als Pufferfeder eingesetzt [5.94]. Ihren Aufbau zeigt Bild 4.4 im Abschnitt 4. Sie zeichnet sich auf Grund ihres Aufbaus durch eine hohe „Eigendämpfung“ aus, die infolge der Reibkräfte an den Kegelflächen bei Belastung der Ringsäule in axialer Richtung entsteht, woraus ihre besondere Eignung für die Dämpfung von Stößen resultiert [5.87][5.125][5.157]. Im Zuge der nun über 80-jährigen Anwendung und der erfolgten Weiterentwicklung für den Einsatz als Spannelemente [5.150], bei dem die radiale Verformung der Ringe infolge der Axialbelastung genutzt wird, hat sich diese Feder als ein äußerst vielseitiges Maschinenelement entwickelt [5.27]. Berechnungsbeziehungen liegen in allen Federbüchern und in Firmenschriften [5.150] vor. Zahlreiche Veröffentlichungen Anfang des 20. Jahrhunderts behandeln Probleme an Schraubenfedern [5.196], die sich im Zuge ihres vielseitigen Einsatzes ergeben hatten. *Luttmann*, *Tolle* und *Röver* befassen sich beispielsweise in der Zeit von 1907 – 1909 mit Verformungen von Schraubenfedern in Reglern, die zusätzlich infolge der Fliehkraftwirkung der Federeigenmasse auftraten [5.106][5.182][5.156][5.198]. Eine solche Reglerfeder zeigt **Bild 5.20**. Diese Betrachtungen sind Vorläufer für Überlegungen, die später zur Berücksichtigung der Federeigenmasse bei Längs- und Querschwingungen von Schraubenfedern angestellt wurden. Verschiedene Beiträge in dieser Zeit hatten „Pendelschwingungen“ mit Federberechnungen zum Thema [5.105], wobei auch schon Mehrmassensysteme an Wellen theoretischen Betrachtungen unterzogen wurden [5.91].



**Bild 5.20:** Schraubenfeder in einem Flachregler nach *Proell* [5.143]

Schließlich hat sich auch das seitliche Ausknicken von Schraubendruckfedern als sehr störend auf ihre Funktion und Lebensdauer (Verschleiß durch Reibung an Führungsbauteilen) ausgewirkt und man versuchte, auch diesem Problem theoretisch näher zu kommen. Eine erste Arbeit dazu veröffentlichte *E. Hurlbrink* [5.70] 1910. Von *Gerolsky* wird bei Nachrechnungen erkannt, dass die dort angegebenen Faktoren zur Knicksicherheit zu hoch gewählt wurden. Schließlich werden von *S. Gross* [5.41] und anderen Mitte des 20. Jahrhunderts Lagerkennzahlen und Knicksicherheitsbereiche angegeben, die heute noch Standard der Federberechnung darstellen.

Alle Autoren, die sich seit dem 19. Jahrhundert mit Berechnungen von Schraubenfedern befasst haben, besprechen in ihren Veröffentlichungen die Auswirkungen der axialen Federbelastung bezogen auf den Drahtquerschnitt und diskutieren die Vernachlässigbarkeit verschiedener Beanspruchungen. Darüber hinaus wird erstmals 1913 von *A. Röver* [5.155] auf die Spannungsverteilung im Drahtquerschnitt einer Schraubenfeder eingegangen und die in Abhängigkeit vom Wickelverhältnis  $c = w = D/d$  sich ergebende Spannungserhöhung an der Windungsinenseite berechnet. Von ihm wird ein mit  $\varphi$  bezeichneter Spannungskorrekturfaktor angegeben.

Dieses Problem wird später von *O. Göhner* erneut aufgegriffen und analytisch recht tiefgründig behandelt [5.37][5.38]. Aus diesen Darlegungen zur Spannungsverteilung im Drahtquerschnitt einer Schraubenfeder ergibt sich schließlich ein mit  $k$  bezeichneter Spannungskorrekturfaktor, der heute noch die Grundlage für alle Spannungsberechnungen an Schraubenfedern bildet. Weitere Spannungskorrekturfaktoren mit „einfacheren“ analytischen Ausdrücken als der von *Göhner* sind von *Wahl* und *Bergsträsser* [5.12] eingeführt worden. Wegen der guten Übereinstimmung mit dem *Göhner*-Faktor werden diese Faktoren häufig anstelle des *Göhner*-Faktors verwendet. Alle drei Beziehungen werden in [5.121] zur Berechnung von Schraubenfedern angegeben.

Von *Forster* (USA) wurde 1945 die Negator-Feder entwickelt, die auch als Rollfeder in den Anordnungen A-Motor und B-Motor bekannt ist. Berechnungsbeziehungen sind in [5.186][5.122] und [5.78][5.53] aufgeführt. Auch zu Spiralfedern wurden neue Erkenntnisse über den Einfluss der Einspannstellen der Federenden auf die Federspannungen publiziert [5.169] (s. a. [5.72]).

Wesentliche Impulse für Forschungen auf dem gesamten Gebiet der Federtechnik gab der im Jahre 1929 auf Anregung der Deutschen Reichsbahn gegründete Fachausschuss für Federn, der seine Arbeit in den beiden Unterausschüssen, dem Bauartenausschuss beim Verein deutscher Ingenieure (VDI) und dem Fertigungsausschuss (Werkstoffausschuss) beim Verein deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), aufnahm. Aus dem in [5.175] enthalte-

nen Vorwort des damaligen Obmannes des Bauartausschuss, Dipl.-Ing. *Paul Speer*, geht hervor, dass sich dieser Ausschuss in den ersten Jahren nach seiner Gründung vorwiegend den Problemen von Blattfedern für Schienenfahrzeuge und den Kraftwagenfedern zugewandt hatte. Aus VDI-Geschäftsberichten der Jahre 1931-1933 ist zu entnehmen [5.84][5.113], dass auf dem Gebiet der Maschinenelemente die Federn besonders erfolgreich bearbeitet wurden.

Die Federberechnung wurde bisher nach Formeln durchgeführt, die auf stark vereinfachten Annahmen beruhen. Der Fachausschuss für Federn beim VDI konnte im Rahmen der organisierten Forschungen die Formeln für die Berechnungen von Blattfedern nach planmäßigen Untersuchungen der einzelnen Einflüsse richtig stellen. Ähnliche Vorhaben sind für die anderen Federarten geplant. In den Jahresberichten wird weiterhin ausgeführt, dass bis in allerneuste Zeit nicht bekannt war, wie stark sich Eisenbahnfedern und Automobilfedern während der Fahrt durchbiegen. Diesem Problem ist vor allem Dr.-Ing. *Ernst Lehr* nachgegangen [5.99][5.97][5.96]. Bei Pufferfedern und bei Ventildfedern waren die tatsächlich auftretenden Beanspruchungen und die Bruchursachen nicht geklärt. Einer Analyse zufolge gingen zum damaligen Zeitpunkt etwa 60% der Pufferfedern während des Betriebes zu Bruch oder wurden unbrauchbar. Auch an der Lösung dieser Probleme wurde gearbeitet, wie die Aufsätze von *Langer/Thomé* [5.93] und *E. Lehr* [5.98] zeigen.

### **5.5.7 Beiträge von *Gross* und *Lehr* zur Federberechnung Mitte des 20. Jahrhunderts**

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts ist eine Fülle von Beiträgen aller Formen (Vorträge, Zeitschriftenaufsätze, Bücher) zur Federtheorie, zu den Federwerkstoffen, zur Federntechnik und vor allem zu einer praktischen Anwendbarkeit der theoretischen Erkenntnisse einschlägiger Wissensgebiete für eine praxisorientierte Federauslegung zu verzeichnen. Die Entwicklung der Technik forderte in zunehmendem Maße von den in Maschinen, Geräten und Anlagen eingesetzten Maschinenelementen, darunter auch von Federn, ein hohes Maß an Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit. Dazu gehörte nicht zuletzt auch der Nachweis einer sicheren Ausnutzung der Werkstofftragfähigkeiten. Dies war aber nur durch die Bereitstellung entsprechender Werkstoffkennwerte allgemein und für die entwickelten Federwerkstoffe möglich. Zur Realisierung dieses Anliegens haben sich bereits in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts vor allem *August Wöhler* (1819 –

1914), *Johann Bauschinger* (1834 – 1893) und *Carl Bach* (1847 – 1931) verdient gemacht. Während in den Publikationen über Federn des 19. Jahrhunderts und auch noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts der Festigkeitsnachweis auf Grund der größtenteils noch fehlenden speziellen Festigkeitswerte für Federwerkstoffe, die es außerdem zum größten Teil noch nicht gab, keine besondere Rolle spielte, wendete man sich jetzt immer öfter diesem Anliegen zu.

Diesem Bestreben, neben der Berechnung der Verformung (Funktionsnachweis) der Federn auch die Seite der Tragfähigkeit zuverlässig abschätzen zu können, dienten auch Arbeiten, die sich einer exakteren Bestimmung der Nennspannungen zuwendeten [5.100]. Für die stabförmigen Grundkörper von Federn waren die Grundbeziehungen für Biege- und Torsionsspannungen seit langem bekannt (s. Abschnitt 5.3). Federn besitzen jedoch vielgestaltige Körperformen, die ganz oder abschnittsweise gerade, gekrümmt, gebogen, gewunden oder spiralförmig sein können. Im vorherigen Abschnitt wurden bereits die Arbeiten von *A. Röver* erwähnt, in denen die Spannungserhöhung an der Windungsinenseite von Schraubenfedern besprochen wurde. Sehr tiefgründig wird dieses Problem dann 1930 von *O. Göhner* bearbeitet [5.37][5.38]. Der von ihm ermittelte und in die Literatur als Göhner-Faktor eingegangene Korrekturfaktor für die Schubspannungen im Drahtquerschnitt von Schraubenfedern ist vom Wickelverhältnis  $w = D/d$  abhängig und ist seitdem in allen Berechnungsunterlagen für Schraubenfedern verankert. Da dieser Korrekturfaktor Ergebnis einer Reihenentwicklung ist, erschien er vielen Anwendern als etwas zu kompliziert. So wurden, wie schon im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, von *Wahl* und *Bergsträßer* einfachere Beziehungen gefunden, die wegen der nur gering abweichenden Werte gegenüber dem Göhner-Faktor oft angewendet werden [5.67] (s. a. [5.154][5.36][5.12]).

Eine wesentliche Weiterentwicklung erfuhr die Federntechnik (Berechnung, Herstellung und Werkstoffe) durch die Arbeiten von *Siegfried Gross* und *Ernst Lehr*. Im VDI-Verlag erschien 1938 von diesen beiden Autoren eine beachtenswerte Monographie zu den Federn [5.48]. Diese umfassende Darstellung der statischen und vor allem dynamischen Berechnung der Federn hat es in dieser Form in den nachfolgenden Jahren des 20. Jahrhunderts nicht mehr gegeben. Deshalb wird auch heute noch, besonders wenn es um Schwingungsprobleme an Federn geht, auf dieses Werk zurückgegriffen. Ende des 20. Jahrhunderts werden in [5.122] und [5.121] von *M. Meissner*, *K. Wanke* und *H.-J. Schorcht* auch dynamische Berechnungen an Federn (Federantriebe, Eigenfrequenzen) wieder in einem „Federnbuch“ behandelt. Die fruchtbare Zusammenarbeit von *Gross* und *Lehr* wird durch den 2. Weltkrieg je unterbrochen. *E. Lehr* kehrt aus dem Krieg nicht mehr zurück.

S. Gross bringt 1942 sein Buch über die Berechnung und Gestaltung von Metallfedern heraus [5.41]. Mit diesem Buch wird nach *Gerolsky* erstmals wieder umfassend der Federentwurf auf neuestem Stand behandelt. Als wesentliche Fortschritte bzw. Neuerungen sind zu verzeichnen, dass Federwerkstoffe mit ihren Festigkeitswerten (statische Festigkeitswerte und Dauerfestigkeitswerte) aufgeführt werden, die Federkennlinie als wichtige Funktionsdarstellung der einzelnen Federarten besprochen, die Federarbeit (nach Ansätzen von *Castigliano* und *Gerolsky*) umfassend eingearbeitet und die Berechnung und Gestaltung einer Reihe neuer Federarten (Ringfeder, Tellerfeder ...) aufgenommen wird. Bis zur 3. Auflage 1960 werden weitere Neuerungen und Erkenntnisse aufgenommen. Das Buch gehört über Jahrzehnte zum Standardwerk der Federntechnik. Neben diesen Büchern werden von *Gross* und anderen in zahlreichen Publikationen in verschiedenen Fachzeitschriften Probleme der Federn behandelt und neue Federformen und ihre Berechnung vorgestellt (s. Literaturverzeichnis in [5.122] und [5.121] sowie [5.49][5.104][5.42]). Auch Ansätze zur Berechnung der Quersteifigkeit von Schraubenfedern sind schon zu verzeichnen [5.148].

### 5.5.8 Normen zur Berechnung von Federn

Die gezielte Erarbeitung von Normen begann in Deutschland 1917 mit der Gründung des *Normenausschusses* der **Deutschen Industrie (NDI)**, der später (1926) in **Deutscher Normenausschuss (DNA)** umbenannt wurde [5.133]. Bald organisierte dieser die umfangreiche Normenarbeit auf der Grundlage von Normenausschüssen, die nach und nach für bestimmte Teilgebiete der Technik gegründet wurden. So konstituierte sich 1925 für das Fachgebiet der Federn der *Arbeitsausschuss Federn (AF)*, der dann 1933 nach vielen Vorarbeiten mit **DIN** Entwurf 1 E 2075 Schraubenfedern das erste Normblatt über Federn herausgab. In diesem Normblatt war bereits eine Rechentafel zur Bestimmung der Abmessungen von Normfedern enthalten.

Nach dem 2. Weltkrieg wurde dann die Normenarbeit auf dem Gebiet der Federn mit der Herausgabe einer Reihe von Normen zur Berechnung von verschiedenen Federn fortgesetzt. Im Januar 1948 erschienen als erste Normen dieser Reihe **DIN** 2089 Zylindrische Schraubenfedern mit Kreisquerschnitt, Berechnung, **DIN** 2090 Zylindrische Schraubendruckfeder aus Vierkantstahl, Berechnung sowie **DIN** 2091 Drehstabfeder, Berechnung. Diesen Normen folgte dann 1949 das Normblatt **DIN** 2088 Gewundene Biegefeder (Schenkelfeder), Berechnung (s. Bild 5.21). Spä-

ter folgten dann noch Normen zur Berechnung von Tellerfedern und anderen Federn.

Alle diese Berechnungsnormen für Federn waren ähnlich aufgebaut. Sie enthielten zunächst die Darstellung der jeweiligen Feder mit Hauptabmessungen und Federkennlinie, die Erklärung der Zeichen und Formelgrößen, die Formeln zur Berechnung von Funktions- und Federgrößen, Berechnungsbeispiele und Angaben zur Werkstoffbeanspruchung. Später sind dann bei Überarbeitungen Konstruktionshinweise dazugekommen und die Titelergänzung lautete dann „Berechnung und Konstruktion“. Dieser Grundaufbau ist bis heute in den Grundzügen beibehalten worden. Die Berechnungsbeziehungen wurden aktualisiert und die Werkstoffangaben mit Hinweisen über zulässige Spannungen wesentlich erweitert. Ein Beispiel eines derartigen Normblattes der Ausgabe 1949 zeigt **Bild 5.21**. In **Tafel 5.2** sind die Normblätter zur Berechnung von Federn aus dieser Zeit zusammengestellt. Ausführlich wird die Normung von Federn und Federwerkstoffen in Kapitel 6 behandelt.

**Tafel 5.2.** Erste Normen für die Berechnung von Federn

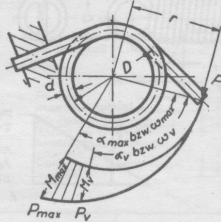
<b>Bezeichnung</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
<b>DIN</b> 2089	Zylindrische Schraubenfedern mit Kreisquerschnitt, Berechnung	01.1948
<b>DIN</b> 2090	Zylindrische Schraubendruckfeder aus Vierkantstahl, Berechnung	01.1948
<b>DIN</b> 2091	Drehstabfeder, Berechnung	01.1948
<b>DIN</b> 2088	Gewundene Biegefeder (Schenkelfeder), Berechnung	07.1949

# Gewundene Biegefeder (Schenkelfeder) Berechnung

Juli 1949

**DIN 2088**

Bei der Berechnung ist der Teil des Verdrehungswinkels vernachlässigt, der durch die Durchbiegung des Schenkels entsteht.



Das Biegemoment  $P \cdot r$  darf nur in dem Sinne wirken, daß die Windungen sich zusammenziehen (d.h. der Windungsdurchmesser  $D$  verkleinert wird).

### Zeichen und Formelgrößen

$d$ [mm]	= Drahtdicke	$\omega$	= Verdrehungsbogenmaß
$D$ [mm]	= mittlerer Windungsdurchmesser	$E$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	= Elastizitätsmodul ( $2,15 \cdot 10^4$ )
$i$	= Anzahl der Windungen	$\sigma_{zul}$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	= Zulässige Biegespannung
$s$ [mm]	= Steigung	$\sigma_1$ [kg/mm <sup>2</sup> ]	= ideale Biegespannung (ohne Berücksichtigung der Drahtkrümmung)
$l$	= gestreckte Länge der Windungen	... max	= Index für größtmögliche Betriebsbelastung
$r$ [mm]	= Hebelarm der Kraft $P$	... v	= Index für Vorspannung
$P$ [kg]	= Kraft	... prüf	= Index für Prüfbelastung
$M$ [kgmm]	= Biegemoment $P \cdot r$	$\sigma_B$	= Zugfestigkeit
$W$ [mm <sup>2</sup> ]	= Widerstandsmoment (Biegung)	$k$	= Beiwert, abhängig vom Wickelverhältnis $\frac{D}{d}$ (Schaubild siehe Seite 2)
$J$ [mm <sup>4</sup> ]	= Trägheitsmoment (Biegung)		
$\alpha$ [°]	= Verdrehungswinkel		

### Formeln für die Berechnung bei festeingespannten Federenden

- (1)  $M = P \cdot r = W \cdot \sigma_1 = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \cdot \sigma_1 = -0,1 \cdot d^3 \cdot \sigma_1$
- (2)  $\sigma_1 = \frac{P \cdot r}{0,1 \cdot d^3}$
- (3)  $\sigma_{zul} = k \cdot \sigma_1$
- (4)  $M_v = P_v \cdot r$
- (5)  $\alpha = \omega \cdot \frac{180}{\pi} = \omega \cdot 57,3$
- (6)  $\alpha_v = \omega_v \cdot 57,3$
- (7)  $\omega = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} = \frac{P \cdot r \cdot l}{E \cdot J} = \frac{64 \cdot P \cdot r \cdot D \cdot l}{E \cdot d^4}$
- (8)  $\omega_v = \frac{M_v \cdot l}{E \cdot J} = \frac{P_v \cdot r \cdot l}{E \cdot J}$
- (9)  $l = D \cdot \pi \cdot i$  (bei  $s \leq \frac{D}{4}$ )
- (10)  $l = i \cdot \sqrt{(D \cdot \pi)^2 + s^2}$  (bei  $s > \frac{D}{4}$ )

Anmerkung:  $\alpha$  bzw.  $\omega$  ändern sich proportional der ersten Potenz von  $D, i, P$  und  $r$  und umgekehrt proportional der vierten Potenz von  $d$ .

### Berechnungsbeispiele

Gegeben:  $P = 4,5 \text{ kg}$ ;  $D = 30 \text{ mm}$ ;  $r = 30 \text{ mm}$   
 max Verdrehungswinkel  $\alpha = 75^\circ$   
 Werkstoff: Stahl;  $\sigma_{zul} = 40 \text{ kg/mm}^2$   
 $E = 2,15 \cdot 10^4 \text{ kg/mm}^2$

Gesucht:  $d, i$  und  $\alpha_1$

(1)  $P \cdot r = 0,1 \cdot d^3 \cdot \sigma_1$ ;  $d^3 = \frac{P \cdot r}{0,1 \cdot \sigma_1}$   
 $d^3 = \frac{4,5 \cdot 30}{0,1 \cdot 40} = \sqrt[3]{33,7} = 3,23 \text{ mm}$   
 $d = 3,5 \text{ mm}$  (gewählt)

(5)  $\alpha = \omega \cdot 57,3$ ;  $\omega = \frac{\alpha}{57,3} = \frac{75}{57,3} = 1,31$

(9)  $l = D \cdot \pi \cdot i$

(7)  $\omega = \frac{64 \cdot P \cdot r \cdot D \cdot l}{E \cdot d^4}$   
 $= \frac{E \cdot d^4 \cdot \omega}{64 \cdot P \cdot r \cdot D} = \frac{21500 \cdot 3,5^4 \cdot 1,31}{64 \cdot 4,5 \cdot 30 \cdot 30}$

$i = 16$  Windungen

Nachrechnung der Spannung:  
 $\sigma_1 = \frac{P \cdot r}{0,1 \cdot d^3} = \frac{4,5 \cdot 30}{0,1 \cdot 3,5^3} = 31,4 \text{ kg/mm}^2$   
 $\sigma_{zul} = k \cdot \sigma_1 = 1,1 \cdot 31,4 = 35 < 40$

Gegeben: Schraubenfeder aus Stahl  
 $\sigma_{zul} = 40 \text{ kg/mm}^2$ ;  $E = 2,15 \cdot 10^4 \text{ kg/mm}^2$ ;  
 $s = 4 \text{ mm}$ ;  $d = 2 \text{ mm}$ ;  
 $D = 20 \text{ mm}$ ;  $r = 60 \text{ mm}$ ;  $i = 10$

Gesucht:  $P$  und  $\alpha$

Für  $\frac{D}{d} = 10$  ist  $k \approx 1,08$

(1)(3)  $P \cdot r = 0,1 \cdot d^3 \cdot \sigma_1 = \frac{0,1 \cdot d^3 \cdot \sigma_{zul}}{k}$   
 $P = \frac{0,1 \cdot d^3 \cdot \sigma_{zul}}{k \cdot r} = \frac{0,1 \cdot 2^3 \cdot 40}{1,08 \cdot 60} = 0,49 \text{ kg}$

(7)  $\omega = \frac{64 \cdot P \cdot r \cdot D \cdot l}{E \cdot d^4} = \frac{64 \cdot 0,49 \cdot 60 \cdot 20 \cdot 10}{21500 \cdot 16} = 1,09$

(5)  $\alpha = \omega \cdot 57,3 = 1,09 \cdot 57,3 = 62,5^\circ$

Fortsetzung

Bild 5.21: Beispiel eines Normblattes zur Berechnung von Federn [5.199]



## 5.6 Die Entwicklung der Auslegungsrechnungen für Federn in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts bis zur Gegenwart

### 5.6.1 Einzelfederberechnungen

In der Mitte des 20. Jahrhunderts waren die Berechnungsgrundlagen für die damals bekannten Federarten und –formen in für die Praxis hinreichender Weise entwickelt. Die Arbeiten und Beiträge bis zum Ende des 20. Jahrhunderts zur Berechnung von Federn befassten sich meist mit

- Ergänzungen und Verbesserungen bekannter Federberechnungen,
- Entwicklungen von Berechnungsbeziehungen für besondere Federformen innerhalb einer bestimmten Federart,
- Rationalisierung der Berechnung und Auswahl von Federn durch Einsatz von graphischen und anderen Hilfsmitteln sowie Fragen der Federoptimierung und der
- Vorbereitung der Berechnungsgrundlagen für die Nutzung der elektronischen Rechentechnik.

Es kann im Rahmen dieser Darlegungen nur auf Beispiele eingegangen werden, da diese Zeitspanne mit einer Fülle von Beiträgen zur gesamten Federntechnik gekennzeichnet ist, die hier nicht lückenlos aufgeführt werden können.

In dieser Zeit werden neben den bestehenden Fachzeitschriften mit vorwiegend ingenieurtechnischem Inhalt weitere technische Spezialzeitschriften gegründet und herausgegeben, wie beispielsweise die Feinwerktechnik und die Konstruktion, sowie in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts die Maschinenbautechnik. 1949 erscheint im Verlagshaus A. Prost in Coburg die Fachzeitschrift DRAHT, in der in der Folgezeit zahlreiche Publikationen zur Federntechnik und zur Berechnung von Federn erscheinen. Auf eine sehr umfangreiche Arbeit von Dipl.-Ing. **Joachim Huhnen** (1926 – 2000) [5.67], die 1966/67 in dieser Zeitschrift erschien, soll an dieser Stelle besonders hingewiesen werden. Sie analysiert umfassend den damaligen Stand der Federntechnik und der Federberechnungen. Ergänzt wird diese Analyse von *M. Meissner* [5.115].

Auch von *S. Gross* liegen zahlreiche Beiträge zur Berechnung spezieller Federn und Federformen in dieser Zeitschrift vor. So werden in [5.46] Probleme der Berechnung von Spiralfedern, in [5.47] Berechnungsansätze für

Schraubenfedern mit ungleichförmiger Steigung und in [5.44] Berechnungen für nicht-kreiszyllindrische Schraubenfedern (Kaminfedern, Magazinefedern) sowie in [5.49] Kegelstumpffedern behandelt.

In zunehmendem Maß wurden Federn auch in der Feinwerktechnik eingesetzt. Das waren neben Spiralfedern und Schraubenfedern (Zug- und Druckfedern) vor allem Biegefedern aus Federband mit den unterschiedlichsten Formen [5.195][5.158][5.83]. Bei diesen Formfedern kamen Abbiegungen mit unterschiedlichen Biegeradien vor. Neben Untersuchungen der technologischen Bedingungen für Abbiegungen [5.136] sind auch Berechnungsbeziehungen für solche Federformen entwickelt worden. In Arbeiten von *J. Palm* und *K. Thomas* [5.139][5.138][5.140] sind diese Berechnungsgrundlagen den Anwendern vorgestellt worden.

Neben Berechnungsgrundlagen für besondere Federformen der Feinwerktechnik sind auch die Auslegungsbeziehungen für Antriebsfedern bearbeitet und ergänzt worden [5.64][5.95]. Bei diesen Arbeiten von *A. Hoffeld* und *W. Lehmann* standen auch Bestrebungen für eine Rationalisierung des Berechnungsaufwandes im Vordergrund. Das war vor allem in den Jahren von 1970 bis 1990 ein Forschungsschwerpunkt in der allgemeinen Konstruktionstechnik, der mit dem Einzug der elektronischen Rechentechnik in alle Bereiche der Technik, vor allem auch der Federntechnik verbunden war.

Mit Optimierungsproblemen und Problemen der Rationalisierung der Entwicklungsarbeit in der Konstruktion befassen sich in dieser Zeit eine ganze Reihe von Arbeiten, von denen die von *Herber*, *Hager*, *Meissner*, *Branowski*, *Mehner* und *Speckens* als Beispiele aus der Federntechnik hier aufgeführt seien [5.60][5.51][5.120][5.14][5.172][5.114]. Von *G. Mehner* sind darüber hinaus auch Berechnungsgrundlagen für eine allgemeine Schraubenfeder (zylinder-, kegel-, tonnen- und tailenförmig) entwickelt worden.

Über den Einfluss großer Verformungen bei Biegefedern werden von *P. Niepage* [5.135] Betrachtungen angestellt. Von *Niepage* werden auch noch eine Reihe anderer Probleme behandelt. In [5.134] werden verschiedene Verfahren zur Berechnung von Tellerfedern gegenübergestellt, so u. a. die von *Curti* und *Orlando* [5.18][5.19] vor kurzem vorgestellten.

Mit der Berechnung und dem Einsatz von Tellerfedern befassen sich neben *Niepage* auch *W. Hübner* [5.66], *K.-H. Muhr* [5.128][5.127], *M. Mahlke* [5.111] und vor allem *K.-H. Walz* [5.187][5.190][5.188][5.189], der neben Gestaltungs- und Einbauproblemen auch die Berechnung geschlitzter Tellerfedern und Tellerfedern mit Trapezquerschnitt behandelt.

Als in den 30er und 40er Jahren des 20. Jahrhunderts Torsionsstäbe in der Kraftfahrzeugtechnik eingesetzt wurden (Konstruktionen von *Porsche* bei VW), befasste man sich auch mit deren Berechnung (z. B. *S. Gross* [5.45]).

Es werden aber auch prismatische Torsionsstäbe eingesetzt, deren Spannungsberechnung immer wieder zu Diskussionen führte [5.6][5.35] (auch bei Schraubenfedern aus Profildraht), obwohl die Spannungsbeziehungen bereits durch *Saint-Venant* in die Festigkeitslehre eingeführt wurden. *C. Weber* [5.191] und *A. Föppl* [5.26][5.25] behandeln dieses Problem tiefgründig und diskutieren auch Näherungslösungen unter Angabe von Korrekturbeiwerten. *S. Hildebrand* bearbeitet die Anwendung dieser theoretischen Grundlagen auf Spannbänder der Feinwerktechnik [5.61]. Für Anwendungen als Führungselemente in der Feinwerktechnik werden von *W. Tänzer* darüber hinaus Membranfedern untersucht und Berechnungsbeziehungen entwickelt [5.181].

Der am Ende des 20. Jahrhunderts bei den Auslegungsrechnungen für Federn erreichte Stand wird durch die beiden Monographien „Handbuch Federn“ [5.122] und „Metallfedern“ [5.121] mit einem umfangreichen Literaturverzeichnis dargelegt. Daneben ist zu verzeichnen, dass in den meisten Firmenschriften die Berechnungsunterlagen zur Auslegung der jeweiligen Federn enthalten sind [5.126][5.17][5.150][5.22][5.23][5.21].

## 5.6.2 Schwingungsverhalten und Dauerschwingfestigkeit

Die weitere Entwicklung der Federntechnik in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts ist vor allem gekennzeichnet durch

- die Entwicklung und Bereitstellung neuer Federwerkstoffe,
- die Verbesserung der Qualität der Halbzeuge Draht und Federband,
- die Verbesserung der Prüftechnik, vor allem der Dauerschwingprüftechnik und
- der notwendigen Präzisierung der dynamischen Federberechnung.

Diese Entwicklung trifft auf alle Federarten zu, jedoch besonders auf die Gruppe der Schraubenfedern. Die hohen Qualitätsanforderungen bedingen auch neuere Überlegungen zu Verbesserungen der Auslegungsrechnungen. Obwohl die Berechnungsbeziehungen für Schraubenfedern seit *F. Reuleaux* [5.152] bekannt sind, werden immer wieder Verbesserungen, Erweiterungen und Präzisierungen vorgenommen. Auf die Präzisierung der Spannungsbeziehungen durch *Röver*, *Bergsträsser* und *Göhner* wurde bereits eingegangen. Neuere Erkenntnisse über Einflüsse bei Schwingbeanspruchungen und der Dauerschwingfestigkeit erfordern in zunehmendem Maße immer wieder

Präzisionen der „dynamischen Federberechnungen“, vor allem für Schraubenfedern [5.42].

Aufbauend auf den Arbeiten von *Haringx* [5.55] und *Gross* [5.43] wurden von *St. Lutz* [5.109] die Berechnungen der Längs-, Quer- und Dreieigenfrequenzen von Schraubenfedern analysiert und überarbeitet. Messungen mit einer selbst entwickelten Einrichtung und computergestützten Auswertverfahren ergaben z. T. recht große Abweichungen gegenüber den berechneten Werten. Die Erklärung für diese Abweichungen wurde in der Gestaltung der Endwindungen und der Art der Auflagerbedingungen gefunden [5.118] [5.107]. Die Untersuchungen wurden von *V. Geinitz* weitergeführt [5.81] [5.103][5.108].

Neben zahlreichen Arbeiten, die sich mit dem Einsatz der Rechentechnik für Federberechnung und –auswahl beschäftigen und auf die im nächsten Abschnitt eingegangen werden soll, sind auch Arbeiten zu finden, die sich mit dem Einsatz und der Auslegung von Federn in der Mikrotechnik befassen [5.165][5.164].

Die Dauerschwingprüfung hat seit *A. Wöhler*, *J. Bauschinger* und *C. Bach* einen langen Weg genommen, ehe sie auch in der Federntechnik Einzug gefunden hatte. Auf diesem Weg gab es vor allem auch prinzipielle, grundlegende Dinge zu klären. Es fehlten Festlegungen über eine einheitliche Vorgehensweise bei der Festigkeitsprüfung von Werkstoffen und Bauteilen. So findet man Anfang des 20. Jahrhunderts verschiedene Diskussionen zu den elastischen Verformungen [5.9][5.168], zur Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes [5.11] und zum Begriff der „Streckgrenze“ [5.8]. In späteren Jahren wird dann auch für Federwerkstoffe, die im Spannungs-Dehnungs-Diagramm keine ausgeprägte Streckgrenze aufweisen, für die Streckgrenze der Begriff „0,2%-Dehngrenze“ eingeführt.

Mit der Einrichtung und dem Ausbau von Materialprüfungsanstalten an Technischen Hochschulen (1871 TH München, *Bauschinger*; 1884 TH Stuttgart, *Bach* u. a. in Darmstadt und Berlin) ist der Weg für die Prüfungen der Konstruktionsmaterialien und für grundlegende Untersuchungen des Werkstoffverhaltens auf die unterschiedlichsten Beanspruchungen eröffnet worden [5.4]. Obwohl beispielsweise die Anstalt in Stuttgart über eine Drahtzerreißmaschine verfügte, sind spezielle Prüfeinrichtungen für Federn erst viel später entwickelt und in die Ausrüstungen von zentralen Prüfanstalten (z. B. in Darmstadt) aufgenommen worden.

Intensive Untersuchungen an Federwerkstoffen und Federn sind erst in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts zu verzeichnen. Hier war zunächst die Antwort auf die Frage zu finden, ob es Zusammenhänge zwischen statischen Festigkeitswerten „Zugfestigkeit“ und „Streckgrenze“ und bestimmten „dynamischen Festigkeitswerten“ (z. B. die „Biegegewchselfestigkeit“ oder

„Torsionswechselfestigkeit“) gibt. Mit dieser Frage hatte sich 1923 bereits *R. Stribeck* [5.177] befasst. In den 50er Jahren führten *Anton Pomp* und *Max Hempel* umfangreiche Untersuchungen an Federstahldrähten und Schraubenfedern durch [5.57] [5.58][5.59][5.56][5.141]. Es konnte zwar festgestellt werden, dass es zahlreiche Einflüsse auf die Dauerfestigkeit der Federstähle gibt und sich Umrechnungsfaktoren zwischen statischen und dynamischen Festigkeitswerten finden lassen, aber die Streuung der Werte auf Grund der zahlreichen Einflüsse so erheblich ist, dass eine Verallgemeinerung schwierig ist. Diese Umrechnungsfaktoren waren für überschlägige Federentwurfsrechnungen gedacht. Verblieben bzw. durchgesetzt hat sich ein solcher Faktor nur für die Berechnung der zulässigen Torsionsspannung bei Schraubenfedern aus der Zugfestigkeit des Federdrahtes ( $\tau_{zul} = 0,5 \cdot R_m$ ). Diese zweite Seite der Auslegungsrechnungen, die Wahl bzw. Festlegung der Beanspruchungsgrenzen nach der Höhe der ertragbaren Werkstoffbeanspruchungen bei den entsprechenden Federbelastungen, stellt von jeher einen großen Unsicherheitsfaktor dar. Werden die Beanspruchungsgrenzen zu hoch angesetzt, ist die Versagenswahrscheinlichkeit der Feder groß. Wird sie zu klein angesetzt, ist die Eigenmasse der Feder groß und die Feder ist „unwirtschaftlich“ ausgelegt. Um die Federn sicher und zuverlässig auslegen zu können, sind in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche Dauerschwingversuche sowohl an Federwerkstoffen als auch an Federn durchgeführt worden. Als Beispiele sollen hier die Untersuchungen von *B. Kaiser* und *K.-H. Kloos* in Darmstadt angeführt werden [5.82][5.74][5.77][5.76]. Dabei wurden auch eine Reihe von Einflussfaktoren untersucht, u. a. der Einfluss von Wickeleigenspannungen [5.116] [5.73] [5.117] und der Einfluss verschiedener Oberflächenbehandlungen (Kugelstrahlen ...) [5.82] [5.75]. Auch Federbrüche wurden analysiert, um Versagensursachen zu ermitteln [5.89].

Seit den Untersuchungen von *Pomp* und *Hempel* in den 50er Jahren über technologische und metallurgische Einflüsse auf Federwerkstoffe wurde immer wieder das Augenmerk auf die Verarbeitungsweise des Halbzeuges (Federdraht und Federband) gerichtet und die Ursachen für Unregelmäßigkeiten, vor allem in der Schraubenfederfertigung, im Ausgangsmaterial gesucht. Im seit 1962 an der TU Ilmenau (damals noch Hochschule für Elektrotechnik, später dann TH) bestehenden Forschungslabor für Federn und Federntechnik, das nach 1991 mit Hilfe der Federindustrie, unterstützt durch den VDFI und das ThMfKW, modern mit Versuchstechnik ausgerüstet wurde, sind zu dieser Problematik eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt worden. Von *V. Geinitz* und Mitarbeitern sind durch systematische Untersuchungen eine Reihe von Einflussquellen ermittelt und Vorschläge für deren Beseitigung unterbreitet worden [5.29][5.81]. Auf Initiati-

ve von Dr.-Ing. *Uwe Otzen*, der die Forschungsarbeiten zur Federntechnik dieses Forschungslabors stark gefördert hatte, wurden auch Möglichkeiten zur Steigerung des elastischen Formänderungsvermögens von Schraubendruckfedern untersucht [5.31][5.30][5.137][Pat7].

### 5.6.3 Rechnerunterstützter Federentwurf (Rechnereinsatz in der Federntechnik)

In den letzten Jahrzehnten wird über zahlreiche Arbeiten berichtet, die sich mit der Nutzung der elektronischen Rechentechnik für die Lösung der unterschiedlichsten Aufgaben in der Federntechnik beschäftigen. Zu nennen sind hier vor allem Arbeiten, die sich mit dem Einsatz der Rechentechnik zur Unterstützung und Lösung bei der

- Berechnung und Auswahl von Federn,
- Steuerung technologischer Prozesse der Federntechnik sowie
- Simulation dynamischer Vorgänge an Federn

auseinandersetzen.

Den jeweiligen Entwicklungsstufen der Rechen- und Rechnerntechnik angepasst, sind in den letzten 30 Jahren eine Reihe von Berechnungsprogrammen entwickelt worden, in die auch Optimierungsstrategien und Auswahlprogramme für Federn eingebunden wurden. Beispiele hierzu sind in den hier angegebenen Publikationen enthalten [5.119][5.163][5.85][5.162][5.147][5.146][5.145]. Auch viele Firmenschriften und Kataloge der Federhersteller enthalten Berechnungsunterlagen und -programme für die Federn ihres Angebots [5.126][5.22][5.23][5.21]. Von *K. Liebermann* wurde ein Programm zur Berechnung und Auswahl von Schraubendruckfedern mit der Bezeichnung „**FedPro**“ entwickelt, in das auch Optimierungsstrategien integriert wurden [5.102]. Die Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) mit den entsprechenden Programmunterlagen und deren Zuschnitt auf die Berechnung von Federn ermöglicht Spannungs- und Verformungsberechnungen an verschieden geformten Biege- und Torsionsfedern. Dabei kommt es darauf an, vom zu bearbeitenden Objekt eine für diese Berechnungen geeignete Modellstruktur zu erarbeiten [5.161] [5.80][5.166].

Durch die Verwendung präzisierter Federmodelle ist auch die Simulation dynamischer Vorgänge mit Federn und in Federn möglich. Von *T. Wittkopp* wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das die Untersuchung des statischen und dynamischen Verhaltens von Schraubendruckfedern in allen

Raumrichtungen ermöglicht [5.193]. Unter anderem ist es geeignet, die von *K. W. Maier* in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts durchgeführten Stoßuntersuchungen an Schraubendruckfedern [5.112] nachzubilden. **Bild 5.22** zeigt einen Vergleich der Ergebnisse. *Maier* verwendete für seine Versuche eine selbst entwickelte Hochgeschwindigkeitskamera, mit der er den Stoßwellenverlauf innerhalb einer Schraubendruckfeder aufzeichnen konnte. Mit dem von *Wittkopp* entwickelten Modell und der Verwendung entsprechender Software lassen sich die Stoßwellenverläufe innerhalb einer Schraubendruckfeder simulieren und die Ergebnisse von *Maier* bestätigen. Damit ist Ende des 20. Jahrhunderts ein Stand der Grundlagen für die Berechnung und Auswahl von Federn erreicht, der es gestattet, immer feiner strukturierte Federmodelle zu behandeln.

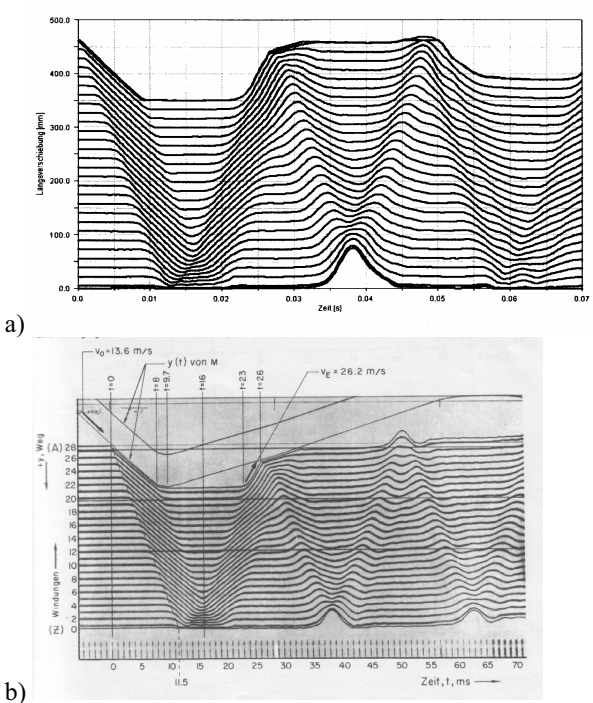
## 5.7 Zusammenfassung

Die mathematische Elastizitätstheorie, deren man sich bis heute zur Berechnung der Spannungen und Verformungen in belasteten Körpern, unter anderem der Federn, bedient, wurden im 18. und 19. Jahrhundert weitgehend entwickelt. Als die eigentlichen Begründer der Technischen Mechanik, die sich in dieser Zeit von der abstrakt-mathematischen Mechanik schied, sind *Navier*, *Saint-Venant*, *Coriolis* und *Poncelet* anzusehen. Während *Navier* vorwiegend die Elastizitätstheorie entwickelte, trat bei *Coriolis* und ganz besonders bei *Poncelet* schon die dynamische Auffassung bestimmter Aufgaben in den Vordergrund. Besonders die schnell laufenden Dampfmaschinen der Lokomotiven [5.149] stellten der technischen Dynamik, die (wie viele andere Theorien) zuerst vornehmlich in Frankreich und auch in England entwickelt und weiterentwickelt wurden, dringliche Aufgaben. Sie riefen dann auch in Deutschland Mitte des 19. Jahrhunderts drei große Ingenieure *Julius Weisbach*, *Ferdinand Redtenbacher* und seinen Schüler *Gustav Zeuner* auf den Plan, die vor allem bei der ingenieurtechnischen Umsetzung der mechanischen Grundlagen maßgeblich mitwirkten.

In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts widmete man sich unter Abkehr von analytischen Methoden, die von den Ingenieuren oft als zu schwierig und zu aufwändig empfunden wurden, vornehmlich der systematischen Ausbildung der grafischen Statik zu. Mit *Culmann*, *Ritter*, *Mohr* und *A. Föppl* gingen zahlreiche grafische Verfahren in die Geschichte der Mechanik ein.

Unter den ständig wachsenden Anforderungen an Werkstoff und Festigkeit drang auch die Erkenntnis immer weiter vor, dass die Anwendung der Elastizitätstheorie auf die Berechnung der Maschinenteile (darunter auch der

Federn) durch den Versuch überwacht und ergänzt werden müsste. *Galilei* (s. Bild 5.4), *Hooke* (s. Bild 5.3) sowie *Coulomb* (s. Bild 5.7) und *Young* (s. Bild 5.8) haben das in der Vergangenheit schon praktiziert. Grundlegend sind in dieser Richtung die klassischen Arbeiten von *Wöhler*, *Bauschinger* und *Bach* sowie von *Striebeck* zu nennen.



**Bild 5.22:** Stoßwellenverläufe durch eine Schraubendruckfeder  
 a) MKS-Simulation nach *Wittkopp* [5.193];  
 b) Versuche von *Maier* [5.112]

Damit waren sowohl von der mechanischen als auch von der werkstofflichen Seite die Grundlagen für die Berechnung und Konstruktion von Federn gelegt. *Reuleaux* ist es dann zu verdanken, der die damaligen Erkenntnisse zur Berechnung, Konstruktion und Herstellung von Federn in einem Buch



zusammenfasste [5.152]. Über *Grashof*, *Bach*, *Castigliano* und *Gerolsky* sind dann immer wieder Aktualisierungen und die Einarbeitung neuer Erkenntnisse der Federberechnungen vorgenommen worden. Entscheidende Impulse für die Forcierung der Federforschung wurden vom 1929 beim VDI gegründeten Fachausschuss Federn gegeben. Diese im Jahre 1930 eingeleitete aktive Phase der Bearbeitung von Federproblemen schlägt sich auch in einer regen Publikationstätigkeit zu Federn in ingenieurtechnischen Fachzeitschriften nieder. Mit *Gross* und *Lehr* und vielen anderen Fachleuten auf dem Gebiet der Federn wurden in der Mitte des 20. Jahrhunderts zahlreiche Fragen und Probleme der Federntechnik gelöst. Viele dieser Ergebnisse fanden in [5.48] ihren Niederschlag. Den Schienenfahrzeugfedern widmet *Kreissig* [5.88] in seinem Buch aus dem Jahre 1936 ein umfangreiches Kapitel. Von *Wolf* wurden speziell Schraubenfedern behandelt [5.194]. Eine umfassende Bibliographie [5.2] über Federn listet – von Hooke’s Veröffentlichung ab – viele Artikel und Bücher bis Mitte 1952 sowie Patente ab 1934 chronologisch auf. Das Buch „Federn und ihre schnelle Berechnung“ des Franzosen *Reynal* [5.153] von 1929 verfolgt die höchstmögliche Ausschaltung von Fehlern in der Berechnung bei höchstmöglicher Zeitersparnis durch Anwendung graphischer Darstellungen der wichtigsten Formeln. Eine Auswahl der bis heute erschienenen wichtigsten Fachbücher zu Federn und zur Federntechnik enthält **Tafel 5.3**. Schließlich haben auch die größeren Federwerke Zusammenfassungen über Berechnung, Gestaltung und Anwendung ihrer Produkte in Buchform herausgegeben [5.63] [5.174][5.92]. Alle Federberechnungen basieren auf dem Hooke’schen Gesetz [5.65] [5.11]. Erst in neuerer Zeit werden Erkenntnisse der modernen Werkstoffforschung im Zusammenhang mit den Möglichkeiten, die soft- und hardwaremäßig die Computertechnik bietet, bei der Berechnung von Federn genutzt, die auch nichtlineare Zusammenhänge bei Festigkeits- und Verformungsrechnungen berücksichtigen lassen.

Noch in den 1960er Jahren wird die Federberechnung mit den Formeln aus der einfachen Herleitung am Biegebalken bzw. am Torsionsstab durchgeführt. Der Rechenschieber war das bevorzugte Rechengerät und glücklich war derjenige, der den besonderen Feder-Rechenschieber (z. B. den RIBE-Federrechner) nutzen konnte.

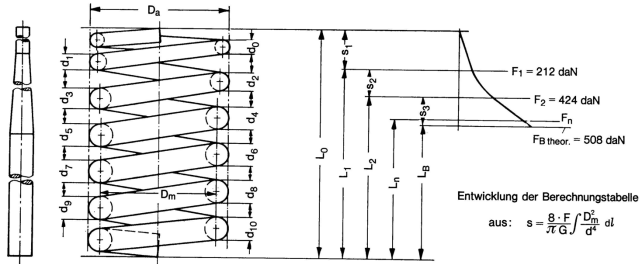
Die einfachen Federarten mit linearer Kennlinie und linearer Einfederung ließen sich so noch einigermaßen zeitgerecht berechnen, jedoch war die schrittweise Durchrechnung einer Feder mit progressiver Kennlinie und inkonstanten Drahtquerschnitten eine Tagesaufgabe mit manchmal ungewissem Ausgang. Ein Beispiel für solche Rechnungen zeigt **Tafel 5.4**.

**Tafel 5.3.** Auswahl wichtiger Fachbücher für Berechnung und Gestaltung von Metallfedern

<b>Nr.</b>	<b>Verfasser</b>	<b>Titel</b>	<b>1. Auflage</b>
1	<i>Franz Reuleaux</i>	Über die Konstruktion und Berechnung der für den Maschinenbau wichtigsten Federarten	1857
2	<i>Carlo Alberto Castigliano</i> (Übersetzung von <i>Richard Totz</i> )	Theorie der Biegungs- und Torsionsfedern	1888
3	<i>W. Gerolsky</i>	Die Berechnung der Biegungs- und Torsionsfedern	1918
4	<i>Ernst Kreissig</i>	Berechnung des Eisenbahnwagens (Darin enthalten: Fahrzeugfedern)	1936
5	<i>Siegfried Gross; Ernst Lehr</i>	Die Federn	1938
6	<i>Siegfried Gross</i>	Berechnung und Gestaltung von Metallfedern	1942
7	<i>A. M. Wahl</i> (Deutsche Bearbeitung von <i>Peter Fischer</i> )	Mechanische Federn	1944
8	<i>Manfred Meissner;</i> <i>Klaus Wanke</i>	Handbuch Federn	1988
9	<i>Manfred Meissner;</i> <i>Hans-Jürgen Schorcht</i>	Metallfedern	1997

Die ersten verwendeten elektronischen Tischrechner, z. B. HP 85 und HP 86 von Hewlett Packard, waren trotz ihrer geringen Speicherkapazität eine enorme Hilfe, weil die Rechengeschwindigkeit zu- und die Rechenfehlerzahl abnahm. Die ersten bescheidenen Rechenprogramme wurden mit zunehmender Speicherkapazität ausgeweitet und auf Großrechner gelegt. Dezentrale mittelgroße Rechner vor Ort, z. B. HP 1000, erlaubten den Anschluss mehrerer Terminals, so dass jeder Konstrukteur unabhängig von den Kollegen und gleichzeitig rechnen konnte. Trotzdem beschränkte man sich noch auf die Auslegung der Feder in Geradeinfederung, was keine gültigen Ergebnisse für die fast ausnahmslos im Kraftfahrzeug unter „Kreisbogenbedingungen“ arbeitenden Schraubenfedern lieferte.

**Tafel 5.4.** Berechnungsbeispiel zur Ermittlung der Kraft-Weg-Kennlinie einer Schraubendruckfeder mit inkonstantem Stabdurchmesser (Datenprotokoll)



Im Beispiel ist der Außendurchmesser konstant (Da = 78 mm)

1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*	9*	10*	11*	12*	13*	14*
n	dn	Dmn		$\frac{D_{mn}^2}{d^4}$	$\sum \frac{D_{mn}^2}{d^4}$	$\frac{\Delta l}{2}$				cn	F	ΔF	Δs
		$D_a - 2^*$	$\sum 3^*$	$\frac{4^* \cdot 2}{2^* \cdot 4}$	$\sum 5^*$	$\frac{\pi \cdot 4^*}{4}$	$6^* \cdot 7^*$	$\sum 8^*$	$\frac{\pi \cdot 981}{9^*}$	$\sum 10^*$	$2^* \cdot 3^* \cdot \tau_{zul}$	aus	$13^*$
								$n_{max}$			$2,55 \cdot 3^*$	$12^*$	$11^*$
0	8,0	70,0		1,2					627,9	4,9	212 <sup>1)</sup>		
1	8,5	69,5	69,75	0,926	2,126	54,75	116,5		511,4	6,02	255 <sup>1)</sup>	43	7,9
2	9,0	69,0	69,25	0,725	1,651	54,3	89,6		421,8	7,31	305 <sup>1)</sup>	50	7,50
3	9,5	68,5	68,75	0,577	1,302	54,0	70,4		351,4	8,78	360 <sup>1)</sup>	55	6,83
4	10,0	68,0	68,25	0,462	1,039	53,6	55,6		295,8	10,41	424 <sup>1)</sup>	64	6,67
5	10,0	68,0	68,0	0,462	0,924	53,4	49,3		246,5	12,45	508 <sup>2)</sup>	84	7,35
6	10,0	68,0	68,0	0,462	0,924	53,4	49,3		197,2	15,60	508 <sup>2)</sup>	0	0
7	10,0	68,0	68,0	0,462	0,924	53,4	49,3		147,9	20,81	508 <sup>2)</sup>	0	0
8	10,0	68,0	68,0	0,462	0,924	53,4	49,3		98,6	31,19	508 <sup>2)</sup>	0	0
9	10,0	68,0	68,0	0,462	0,924	53,4	49,3		49,3	62,47	508 <sup>2)</sup>	0	0
10	10,0	68,0	68,0	0,462	0,924	53,4	49,3				508 <sup>2)</sup>	0	0

1)  $\tau_{1,zul} = 74 \text{ daN/mm}^2$  2)  $\tau_{1,zul} = 88 \text{ daN/mm}^2$

Wegen des stetigen Abwäzens der progressiven Windungen wird für diese eine niedrigere zulässige Beanspruchung als für lineare Windungen gewählt.

**Konstruktion der Federkennlinie**

Linearer Teil 1  
 $F_{linear} = 212 \text{ daN}$  bei  $s_{linear} = 43 \text{ mm}$  zeichnen

Progressiver Teil  
 Fortlaufend  $\Delta F = 44 \text{ daN}$  bei  $\Delta s = 7,9 \text{ mm}$  bis  
 $\Delta F = 64 \text{ daN}$  bei  $\Delta s = 6,67 \text{ mm}$  zeichnen

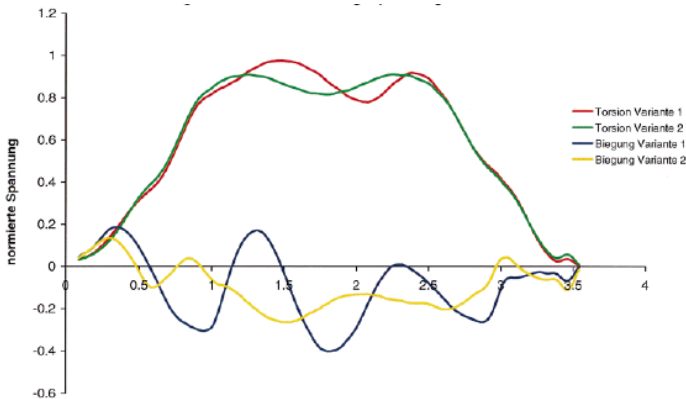
$$s_{linear} = \frac{12^*}{10^*} = \frac{212}{4,9} \frac{\text{daN}}{\text{daN/mm}} = 43 \text{ mm}$$

Linearer Teil 2  
 $\Delta F = 84 \text{ daN}$  bei  $\Delta s = 7,35 \text{ mm}$  zeichnen

Auch die Blattfedern wurden als gestreckter Balken gerechnet, obwohl sie doch wegen ihrer Elastizität große Federbewegungen ausführten (s. dazu auch Niepage [5.135]).

Die Hoesch-Federgruppe startete deshalb zur Lösung dieser Berechnungsprobleme im Jahre 1985 das EDV-Projekt „Rechnergestützte Federentwicklung“ [5.54], welches von Mathematikern bearbeitet, die schnellere und kostengünstigere Federentwicklung gestattet [5.176].

Durch kombinierte Anwendung der Finite Element Methode und der multi-axialen Schädigungsrechnung [5.32] sind erhebliche rechnerische Fortschritte erzielt worden. Als Ergebnis liegen detaillierte Spannungsverläufe (**Bild 5.23**) vor, werden die Verformungen bei realer Kinematik visualisiert und die Versagensorte angezeigt.



**Bild 5.23:** Variantenvergleich der Torsions- und Biegespannungen an der Innenseite eines Federdrahtes [5.32]

In einem Arbeitskreis aus Mitarbeitern der Universität Ilmenau, der Automobilindustrie und der Federhersteller wurden die bisher existierenden Berechnungsmöglichkeiten der einzelnen Häuser kritisch bewertet, um zukünftig eine möglichst einheitliche Federanalyse zu erreichen [5.124]. Derartige Arbeiten werden in zunehmendem Maße auch vom 2000 in Ilmenau gegründeten Steinbeis-Transferzentrum für Federntechnik weitergeführt.

## 6 Die Entwicklung der deutschen Normung für Federn

### 6.1 Anfänge der deutschen Normung

#### 6.1.1 Vorstufen

In Deutschland, wie auch in vielen anderen europäischen Staaten, nahm die Industrialisierung im 19. Jahrhundert immer weiter zu. Damit verbunden waren Gedanken zur Rationalisierung, um die Entwicklung stetig voranzutreiben. Vereinheitlichungen der an unterschiedlichen Standorten gefertigten Produkte in Form, Größe, Werkstoff und Zustandsbedingungen regte vor allem das Interesse in den einzelnen Staaten an einer Normung bestimmter Produkte an.

Bei der geschichtlichen Aufarbeitung der Normenentwicklung für Federn ist deshalb nicht nur die Gründung des Normenausschusses für Federn (NA-Federn, eingetragen als Arbeitsausschuss Federn) am 25. Dezember 1925 von Bedeutung. Auch die vielen Vorstufen zur Normung von Produkten, die vor allem Vereinbarungen über Warenbeschaffenheiten enthielten, sind wesentlich.

Die ersten Bestrebungen zu einer Normung sind aus der Elektrotechnik bekannt. Im Jahre 1896 wurde beispielsweise eine erste „VDE-Vorschrift“ über Kabelschuhe und Klemmschrauben herausgegeben. Aber auch aus dem Maschinenbau gibt es Vorläufer von Normen, vor allem aus dem Bereich der Werkstoffe. **Tafel 6.1** gibt eine Übersicht über die Bestrebungen zur Normung bis zur Gründung des Normenausschusses der Deutschen Industrie 1917 (später: Deutscher Normenausschuss).

Auf der 4. Sitzung des Normenausschusses am 20. Oktober 1917 lagen die ersten fünf Normentwürfe

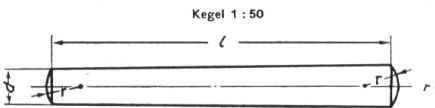
- Kegelstifte,
- Gewichte für Kegelstifte,
- Normaldurchmesser,
- Normblatt (drucktechnische Gestaltung) und
- Bezeichnungen, Blattgrößen, Maßstäbe, Farben der Gestaltung

vor.

Im Januar 1918 wurden die fünf genannten Normentwürfe als D I-Norm 1 bis 5 zur kritischen Begutachtung veröffentlicht. D I-Norm 1 „Kegelstifte“ wurde im März 1918 als erstes Normblatt herausgegeben. **Bild 6.1** zeigt diese Ausgabe.

DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN	<h1 style="margin: 0;">Kegelstifte</h1>	D I NORM <b>1</b>
---------------------------------	---	----------------------

Kegel 1 : 50



Beispiel für die Bezeichnung: Kegelstift 3 x 30 D I NORM 1

Maße in mm

Länge	Durchmesser d																										
	1	1,25	1,6	2	2,5	3	4	5	6,5	8	10	13	16	20	25	30	40	50									
10	1x10	1,25x10																									
12	1x12	1,25x12	1,6x12																								
14	1x14	1,25x14	1,6x14	2x14																							
16	1x16	1,25x16	1,6x16	2x16	2,5x16																						
18	1x18	1,25x18	1,6x18	2x18	2,5x18	3x18																					
20		1,25x20	1,6x20	2x20	2,5x20	3x20	4x20																				
22		1,25x22	1,6x22	2x22	2,5x22	3x22	4x22	5x22																			
24			1,6x24	2x24	2,5x24	3x24	4x24	5x24																			
26			1,6x26	2x26	2,5x26	3x26	4x26	5x26	6,5x26																		
28				2x28	2,5x28	3x28	4x28	5x28	6,5x28	8x28																	
30					2x30	2,5x30	3x30	4x30	5x30	6,5x30	8x30																
32						2,5x32	3x32	4x32	5x32	6,5x32	8x32	10x32															
36							2,5x36	3x36	4x36	5x36	6,5x36	8x36	10x36	13x36													
40								3x40	4x40	5x40	6,5x40	8x40	10x40	13x40	16x40												
45									4x45	5x45	6,5x45	8x45	10x45	13x45	16x45												
50									4x50	5x50	6,5x50	8x50	10x50	13x50	16x50	20x50											
55										5x55	6,5x55	8x55	10x55	13x55	16x55	20x55	25x55										
60										5x60	6,5x60	8x60	10x60	13x60	16x60	20x60	25x60	30x60									
70											6,5x70	8x70	10x70	13x70	16x70	20x70	25x70	30x70	40x70								
80												6,5x80	8x80	10x80	13x80	16x80	20x80	25x80	30x80	40x80	50x80						
90													8x90	10x90	13x90	16x90	20x90	25x90	30x90	40x90	50x90						
100														8x100	10x100	13x100	16x100	20x100	25x100	30x100	40x100	50x100					
110															10x110	13x110	16x110	20x110	25x110	30x110	40x110	50x110					
120																10x120	13x120	16x120	20x120	25x120	30x120	40x120	50x120				
130																	13x130	16x130	20x130	25x130	30x130	40x130	50x130				
140																		13x140	16x140	20x140	25x140	30x140	40x140	50x140			
150																			13x150	16x150	20x150	25x150	30x150	40x150	50x150		
165																				16x165	20x165	25x165	30x165	40x165	50x165		
180																					16x180	20x180	25x180	30x180	40x180	50x180	
200																						20x200	25x200	30x200	40x200	50x200	
230																							20x230	25x230	30x230	40x230	50x230
260																								25x260	30x260	40x260	50x260

Die Stiftlänge l ist die Traglänge. Für die Kuppen ist ein Längenzuschlag von insgesamt ~ 0,3 d vorzusehen.

**Handelsüblicher Werkstoff:**  
 Bis d = 20 mm Stahl von 60 ÷ 80 kg/mm<sup>2</sup> Festigkeit und 15 ÷ 10% Bruchdehnung  
 Ueber d = 20 mm Stahl von 50 ÷ 60 kg/mm<sup>2</sup> Festigkeit und 18 ÷ 15% Bruchdehnung  
 Meßlänge: 10 mal Durchmesser des Probestabes  
 Gewichte: siehe DINORM 2

März 1918

Geschäftsstelle: Normenausschuß der Deutschen Industrie, Berlin NW7, Sommerstr. 4a  
 Nachdruck nur mit Genehmigung des Normenausschusses der Deutschen Industrie gestattet.

**Bild 6.1:** Das erste deutsche Normblatt D I-Norm 1 „Kegelstifte“ erschien im März 1918

**Tafel 6.1.** Vorstufen der deutschen Normung

<b>Jahr</b>	<b>Titel, Aktivität</b>
1856	Gründung des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI). „Das Streben zum gemeinschaftlichen Schaffen“ wird als eine wichtige ingenieurmäßige Aufgabe festgeschrieben.
1869	VDI-Normenprofilbuch für Walzeisen erscheint.
1881	Verein Deutscher Eisenhüttenleute erarbeitet Lieferbedingungen für Eisen und Stahl
1882	Normalien für gusseiserne Druck- und Muffenrohre werden herausgegeben.
1893	Gründung des Verbands der Deutschen Elektrotechniker (VDE). VDE-Vorschriftenbuch erscheint.
1894	Der Begriff „Norm“ taucht erstmals im Siemens Normenbuch auf. Die genormten Teile waren darin maßstäblich abgebildet.
1896	VDE-Vorschrift über Kabelschuhe und Klemmschrauben erscheint.
1908	Eine Schrift „Könische Stifte“ Normalien der Ludwig Loewe & Co. AG wird herausgegeben. Sie ist Vorlage für die erste Norm des DIN, der D I-Norm 1 „Kegelstifte“, die 1918 erscheint.
1914	Herr Baurat Dr.-Ing. E.h. <i>Fritz Neuhaus</i> von der Fa. Borsig, neben Dr.-Ing. E.h. <i>W. Hellmich</i> einer der maßgeblichen Verfechter des Normengedankens, hält auf der 55. Hauptversammlung des VDI in Bremen einen Vortrag zum Thema: „Der Vereinheitlichungsgedanke in der deutschen Maschinenindustrie“.
1917	Der <b>18. Mai 1917</b> ist der Gründungstag des „Normenausschusses der Deutschen Industrie“ mit der Geschäftsstelle des Hauptausschusses „Normalien für den Maschinenbau“ im Haus des VDI Berlin NW 7, Sommerstrasse 4. Die Produkte der Normungsarbeit sollten einstweilig die Bezeichnung „VDI-Norm“ haben.

### 6.1.2 Die Gründung des Deutschen Normenausschusses

Anfang 1917 schlossen sich führende Firmen des Maschinenbaus unter Hinzuziehung von Vertretern aus dem Wissenschaftsbereich (Hochschulen und dgl.) zu einem *Normalien-Ausschuss* für den Maschinenbau zusammen. Bestrebungen zur Vereinheitlichung der Abmessungen bestimmter, häufig wiederkehrender Bauteile des allgemeinen Maschinenbaus, des Kraftfahrzeugbaus, des Lokomotiv- und Eisenbahnwagenbaus und anderer Bereiche der Technik haben zur Bildung dieses Ausschusses geführt. Bald wurden

aber die Grenzen des Maschinenbaus verlassen und diese Bestrebungen auf alle Bereiche der Industrie ausgedehnt. So kam es am 18. Mai 1917 zur Gründung des *Normenausschusses* der *Deutschen Industrie* (NDI). In der Verfassung des NDI war der Grundsatz verankert, dass die vom NDI erarbeiteten und herausgegebenen deutschen Industrienormen aus der Zusammenarbeit von Erzeugern, Verbrauchern und Vertretern der Wissenschaft hervorgehen müssen [6.19].

Die deutschen Industrienormen trugen zunächst die aus „Deutsche Industrie Norm“ abgeleitete Bezeichnung „D I-Norm“, die mit Folgenummern versehen wurden. Diese Norm-Bezeichnungen waren jedoch zu lang. Man entschied sich, anstelle der Bezeichnung „D I-Norm“ das Verbandszeichen DIN zu verwenden. Gestaltung, Bezeichnung und Anwendung des Verbandszeichens DIN sowie des Namens DIN sind in DIN 31 geregelt.

Das Amtsgericht Berlin-Mitte bestätigte am 16. April 1920 die Eintragung des Vereins „Normenausschuss der Deutschen Industrie e.V.“ in das Vereinsregister unter der Nr. 2806. Die Eintragung des DIN als Verbandszeichen erfolgte am 23. Dezember 1920 beim Reichspatentamt unter der Nr. 257 607, Akz. N10115 in die Zeichenrolle.

Im Jahre 1926 erhielt der NDI die Bezeichnung „Deutscher Normenausschuss“ (DNA). Die aus dem Streben nach höchster Wirtschaftlichkeit der Industrie hervorgegangene Normung befasste sich zunächst in wenigen Fachgruppen mit Normalzahlstufungen, Herstellung und Verwendung von Gewinden, Grundnormen für Toleranzen und Passungen, Halbzeugabmessungen (Drähte, Stäbe, Bänder, Profile), Werkstoffen sowie Normen der Elektrotechnik (Spannungs- und Stromstufen, Lampengewinde, Werk- und Isolierstoffe, Bedienungsteile, Kabel).

Allein mit der Verbreitung des Normengedankens und der Herausgabe von DIN-Normen konnte man nicht zufrieden sein. Die Anwendung der Normen in den Betrieben erforderte große Anstrengungen. So wurden zur Arbeit im Normenausschuss auch Vertreter aus Behörden, Schulen, Verbänden und Firmen herangezogen. Dieser große Personenkreis und das große Gebiet der Technik, welches zu bearbeiten war, stellten sich als zu umfangreich heraus. Man beschloss, die Arbeit auf Normenausschüsse (Arbeits- und Fachausschüsse) zu verteilen.



## 6.2 Der Arbeitsausschuss Federn

### 6.2.1 Gründung des Arbeitsausschusses Federn (AF)

In den NDI-Mitteilungen des 8. Jahrgangs vom 15. Oktober 1925 [6.2] wurde die Notwendigkeit der Normung von Zug- und Druckfedern publiziert. Als Begründung wurde angeführt: „Wenn DIN-Normen aufgestellt wären, bestünde in den weitaus meisten Fällen die Möglichkeit, genormte Federn in der Konstruktion zu berücksichtigen“. Der Normenausschuss der Deutschen Industrie (NDI) beabsichtigte daraufhin, einen entsprechenden Fachausschuss zu bilden. Hersteller und Verbraucher von Federn wurden zur Mitarbeit aufgerufen. Sie sollten ihre Bereitschaft bis 15. November 1925 dem NDI mitteilen.

Die erste (konstituierende) Sitzung dieses neuen Fachausschusses, des Arbeitsausschusses Federn (AF), fand daraufhin am **9. Dezember 1925** statt. Zum Obmann dieses Ausschusses wurde Prof. Dr. *Karl Kutzbach* (1875 – 1942), Leiter des Instituts für Maschinenelemente an der TH Dresden, gewählt.

### 6.2.2 Arbeitsprogramm des Arbeitsausschusses Federn

Vor der konstituierenden Sitzung des AF war bereits im Oktober 1923 mit DIN 29 Zeichnungen eine Norm, in der Sinnbilder für die Darstellung von Schrauben-, Kegel-, Blatt- und Spiralfedern festgelegt wurden, erschienen. Diese Ausgabe wurde vom Ausschuss Zeichnungen veröffentlicht. Im Folgedokument vom Dezember 1961 war dann auch der Ausschuss Federn als Mitherausgeber aufgeführt.

Auf der Gründungssitzung 1925 entschied man sich für den Beginn der bereits vorgeschlagenen Normung von Zug- und Druckfedern. Zunächst sollten die Entwürfe über Benennungen, Drahtdicken für handelsübliche Schraubenfedern und Vordrucke zur Bestellung von Konstruktionsfedern erarbeitet werden. Dazu wird auf der Sitzung des Arbeitsausschusses Federn vom 11. November 1926 [6.3] vorgeschlagen, die Durchmesserstufungen für handelsübliche Federn auf der Grundlage der Norm über Normzahlen (DIN 323) vorzunehmen und dafür die 10. Reihe (Grundreihe R10) zu verwenden. Für Zwischenstufen war die 20. Reihe (Grundreihe R20) vorgesehen.

Von verschiedenen Firmen wird zu diesem Vorschlag eingewendet, dass für Konstruktionsfedern mit diesen Durchmessern eine optimale Federausle-

gung nicht möglich ist. Aus den Einlassungen der Federhersteller ist ferner zu entnehmen, dass es sich bei der Normung von Federn im Wesentlichen nur um die ganz allgemeinen handelsüblichen Größen handeln kann, weil der Verwendungszweck der Federn eine besonders feine Stufung nicht erfordert. Es wird deshalb beschlossen, für Runddrahtfedern die in **Tafel 6.2** aufgeführten Drahtdurchmesser als normal zu betrachten. Zwischengrößen sollten nach der seit 10/1923 bestehenden Norm **DIN** 177 Stahldrähte gewählt werden.

**Tafel 6.2.** Zur Normung empfohlene Drahtdurchmesser für Runddrahtfedern 1926 [6.3]

<b>Drahtdurchmesser <math>d</math> in mm</b>		
0,2	1,0	5,0
0,25	1,3	6,5
0,31	1,6	8,0
0,4	2,0	10
0,5	2,5	13
0,6	3,1	16
0,8	4,0	20
		25

Über die Normung des Windungsdurchmessers  $D$  wird nach längerer Erörterung Einigung darüber erzielt, nicht den inneren oder äußeren Windungsdurchmesser ( $D_i$ ;  $D_a$ ) sondern den mittleren Durchmesser  $D_m$  zu wählen. Keine Einigung konnte über die Stufung von Windungsdurchmesser, Steigung, Windungszahl oder Zahl der Endwindungen erzielt werden.

Ein bereits bestehender Unterausschuss legte den Entwurf eines Formulars für die Federbestellung vor. Da jedoch die Voraussetzungen für die Verabschiedung des Entwurfs durch die Arbeiten des AF noch nicht gegeben waren, wurden die Arbeiten zunächst zurückgestellt. Weiterhin wird beraten, dass in einem Unterausschuss auch der Entwurf über die Benennung von Federn und ein Vorschlag zur Festlegung von Lieferbedingungen für Federn erarbeitet werden.

Die Tagesordnung der Sitzung des Arbeitsausschusses Federn am 6. Dezember 1927 [6.4] enthielt dann beispielsweise die folgenden zu diskutierenden Punkte bzw. zu bearbeitenden Normenvorschläge:

1. Drahtdurchmesser
2. Formverhältnis
3. Windungsdurchmesser
4. Federtafel und Federtabelle
5. Druckfedern
6. Zugfedern
7. Toleranzen

Bei nicht allen zu behandelnden Punkten konnte eine einvernehmliche Meinung gefunden werden, weil Ergebnisse über laufende Untersuchungen noch nicht vorlagen. Zum Schluss der Sitzung wurde vom Obmann des AF, Prof. Dr. *K. Kutzbach*, der Unterausschuss für die Erarbeitung einer einheitlichen Federbenennung einberufen.

## **6.3 Ergebnisse der Normungsarbeit auf dem Gebiet der Federn**

### **6.3.1 Die ersten Normen über Federn**

Mit der Gründung des Arbeitsausschusses Federn 1925 und der Berufung von Unterausschüssen war die Basis für eine umfassende Normungsarbeit auf dem Gebiet der Federn gegeben. Es sollte jedoch noch einige Jahre dauern, bis die erste Federnorm fertiggestellt war. Zunächst war es wichtig, die grundsätzlichen Fragen der Normung von Federn zu klären, bis es an die Ausarbeitung der Norm über Zug- und Druckfedern ging. Erst viele Jahre später wurden die schon von anderen Gremien ausgearbeiteten Werkstoffnormen mit einbezogen.

Das erste Ergebnis der Normungsarbeit des Arbeitsausschusses Federn (AF) war die Herausgabe des **DIN** Entwurf 1 E 2075 **Schraubenfedern**. In **Bild 6.2** ist diese erste Ausgabe abgebildet. Die Veröffentlichung erfolgte in den **DIN**-Mitteilungen vom 5. Januar 1933 [6.5] mit folgender Bemerkung:

„Wenn auf diesem Gebiet erst jetzt der erste Entwurf veröffentlicht werden kann, so ist dies darauf zurückzuführen, dass einmal die Wünsche der beteiligten Kreise weit auseinander gingen, zum anderen darauf, dass der Ausschuss bemüht war, möglichst viele Anregungen zu berücksichtigen und die Entwürfe möglichst weiten Industriezweigen Rechnung tragend aufzubauen. Die Normung erstreckt sich auf handelsübliche Federn, die in großen Mengen auf den verschiedenen Gebieten verwendet werden“.

Anwendung des noch nicht endgültigen Entwurfs auf eigene Gefahr

**Schraubenfedern**

Druckfedern und Zugfedern mit rundem Querschnitt

(Erläuterungen siehe Seite N 2)

Maße in mm

**Drahtdurchmesser und Formverhältnis**

Drahtdurchmesser d	Formverhältnis				
	Mittlerer Windungsdurchmesser $D_m$ Drahtdurchmesser $d$				
0,2	0,22	—	—	8	10
0,25	0,28	—	—	10	12,5
0,32	0,36	—	—	10	16
0,4	—	—	—	—	—
0,5	0,45	—	—	—	—
0,63	0,56	—	6,3	8	10
0,8	0,7	—	—	—	—
1	0,9	—	—	—	—
1,25	1,1	—	—	—	—
1,6	1,4	—	—	—	—
2	1,8	—	5	6,3	8
2,5	2,25	—	—	—	—
3,2	2,8	—	—	—	—
4	3,6	4	5	6,3	8
5	4,5	—	—	—	—
6,3	5,6	—	—	—	—
8	7	—	—	—	—
10	9	4	5	6,3	8
12,5	11	—	—	—	—
16	14	—	—	—	—
20	18	4	5	6,3	—
25	22,5	—	—	—	—
32	28	—	—	—	—
40	36	—	—	—	—

Durch Fettdruck gekennzeichnete Drahtdurchmesser bevorzugen.

Ausführung: rechtsgängig, linksgängig nur nach besonderer Vereinbarung.

**Druckfedern**

1. Federenden

a) Normale Ausführung

An den Enden wird je eine tote Windung abgelenkt und an die federnden Windungen so angelegt, daß das Drahtende bei den Punkten  $A_0$  und  $A_1$  (Bild 2) die vorhergehende Windung berührt. Die Drahtenden werden dann bis auf eine Enddicke von  $\frac{d}{2}$  abgeschliffen. Bei Drahtdicken über 16 mm können die Enden rechteckig ausgeschmiedet sein (Bild 3).

Zusammengedrückte Länge

$$L_{min} = (i-1) \cdot d + \frac{d}{2} = (i-0,5) \cdot d$$

bzw.  $L_{min} = (i_f+1) \cdot d + \frac{d}{2} = (i_f+1,5) \cdot d$

Unge-spannte Länge  $L_0 = L_{min} + i_f \cdot f_{max}$

b) Behelfsausführungen

α) Enden nur abgeschliffen (nicht angelegt)

β) Enden stumpf abgeschnitten, eine tote Windung angelegt

γ) Enden nur stumpf abgeschnitten (nicht angelegt)

Für Behelfsausführungen gelten die Rechnungswerte des Normblattes nur ungeändert.

2. Windungszahl

Wirksame federnde Windungen  $i_f$ :

2½ (3½) 4½ (6½) 8½ (11½) 15½

**Einspruchsfrist 1. März 1933**

Alle Zuschriften doppelt erbeten

Bild 1

Bild 2

Bild 3

Bild 4

Bild 5

Bild 6

Bild 7

Gesamtwindungen  $i$ :

4½ (6½) 6½ (8½) 10½ (13½) 17½

Durch Fettdruck gekennzeichnete Windungszahlen bevorzugen.

3. Federsteigung  $\frac{H}{d}$  (siehe Bild 2 und 3)

$$\frac{H}{d} = 1 + \frac{\pi \cdot \tau}{G} \left( \frac{D_m}{d} \right)^2$$

$\tau = 7000 \text{ kg/cm}^2$       Ganghöhe  $H = d + f_{max}$

Die Federsteigung ist so zu bemessen, daß bei völlig zusammengedrückter Feder der Werkstoff mit  $\tau = 7000 \text{ kg/cm}^2$  beansprucht ist, die Feder sich also im Betrieb nicht setzen kann.

**Zugfedern**

Federenden

Bild 4

Bild 5

Bild 6

Bild 7

a) Abgelenkte Ösen für Drahtdurchmesser von 0,2 bis 12,5 mm (wobei nur ¼, der Federbeanspruchung zulässig ist)

α) halbrunde Ösen nach Bild 4 (mit Werkzeug zum Abbiegen)

β) kreisrunde Ösen (englische Ösen) nach Bild 5

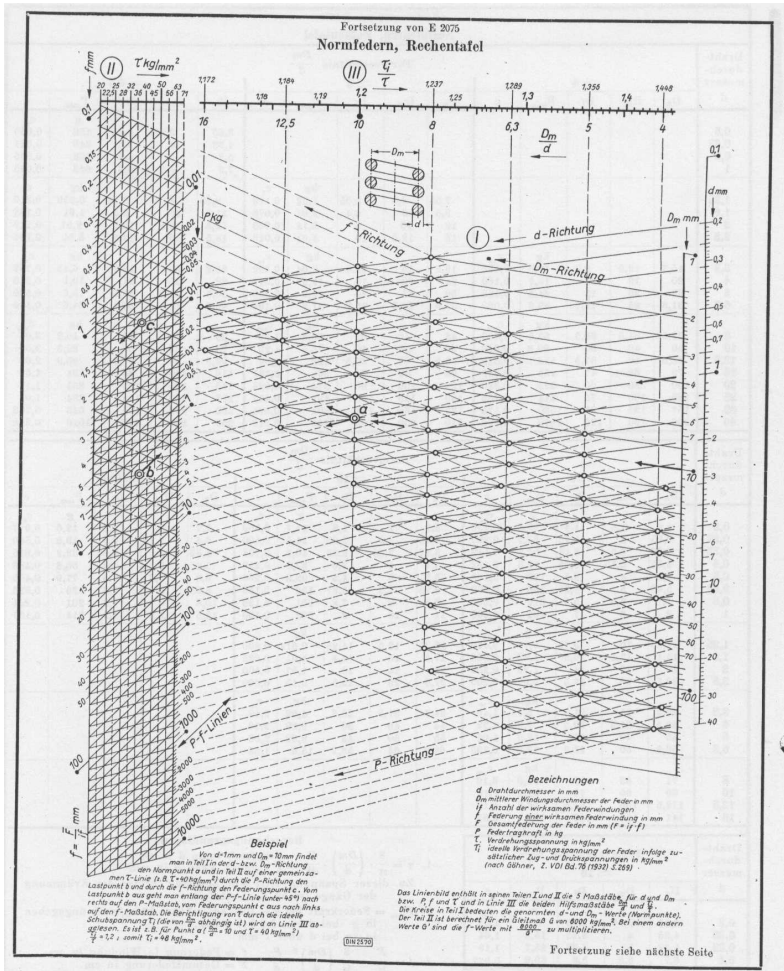
b) Federblechösen nach Bild 6 für Drahtdurchmesser von 0,2 bis 6,3 mm

c) Schraubösen nach Bild 7 für Drahtdurchmesser von 5 mm und darüber.

Zum Ausfüllen der Nuten beim Aufschrauben und Lösen der Feder dienen Nasenkolla, die jedoch die Feder nicht bleibend aufweiten dürfen.

Fortsetzung siehe nächste Seite

**Bild 6.2:** Erster Entwurf einer Norm zu Schraubenfedern vom Januar 1933 (1. Seite)



**Bild 6.2:** Erster Entwurf einer Norm zu Schraubenfedern vom Januar 1933 (2. Seite)

Fortsetzung von E 2570															
Normfedern, Zahlentafel															
Drahtdurchmesser d	Formverhältnis $\frac{D_m}{d}$														
	$\approx 4$					$\approx 5$					$\approx 6,3$				
	$D_a$	$D_m$	$D_1$	$P_{1000}$	c	$D_a$	$D_m$	$D_1$	$P_{1000}$	c	$D_a$	$D_m$	$D_1$	$P_{1000}$	c
0,5											3,65	3,15	2,65	156	$c_{01}$ g
0,63											4,63	4	3,37	246	0,041
0,8														4,2	402
1											7,3	6,3	5,3	623	0,025
1,25															$c_{01}$ kg
1,6						7,55	6,3	5,05	1,22	0,128	9,25	8	6,75	0,959	0,210
2						9,6	8	6,4	2,01	0,078	11,6	10	8,4	1,61	0,153
2,5						12	10	8	3,14	0,063	14,5	12,5	10,5	2,51	0,117
						15	12,5	10	4,91	0,048	18,5	16	13,5	3,84	0,105
3,2	15,7	13,5	9,3	10,3	0,186	19,2	16	12,8	8,04	0,290	23,2	20	16,8	6,43	0,752
4	20	16	12	15,7	0,160	24	20	16	12,6	0,313	29	25	21	10,1	0,610
5	25	20	15	24,5	0,128	30	25	20	19,6	0,250	36,5	31,5	26,5	15,6	0,500
6,3	31,3	25	18,7	39,3	0,099	37,8	31,5	25,2	31,2	0,198	46,3	40	33,7	24,6	0,406
8	39,5	31,5	23,5	43,8	0,073	48	40	32	50,3	0,155	58	50	42	40,2	0,305
10	50	40	30	59,2	0,040	60	50	40	78,5	0,125	73	63	53	62,3	0,250
12,5	62,5	50	37,5	83	0,032	75,5	63	50,5	122	0,102	92,5	80	67,5	95,9	0,209
16	79	63	47	109	0,025	96	80	64	201	0,078	116	100	84	161	0,153
20	100	80	60	146	0,020	120	100	80	314	0,063	145	125	105	251	0,117
25	125	100	75	204	0,016	150	125	100	491	0,047	185	160	135	384	0,105
32	157	125	93	283	0,012	192	160	128	804	0,039	232	200	168	643	0,076
40	200	160	120	393	0,009	240	200	160	1260	0,031	290	250	210	1010	0,061
															$c_{01}$ kg
Drahtdurchmesser d	Formverhältnis $\frac{D_m}{d}$														
	$\approx 8$					$\approx 10$					$\approx 12,5$				
	$D_a$	$D_m$	$D_1$	$P_{1000}$	c	$D_a$	$D_m$	$D_1$	$P_{1000}$	c	$D_a$	$D_m$	$D_1$	$P_{1000}$	c
0,2	1,8	1,6	1,4	19,6	0,256	2,2	2	1,8	50,7	0,600	2,7	2,5	2,3	12,6	$c_{01}$ g
0,25	2,25	2	1,75	30,7	0,205	2,75	2,5	2,25	24,5	0,400	3,4	3,15	2,9	19,5	0,800
0,32	2,82	2,5	2,18	51,5	0,149	3,47	3,15	2,83	40,9	0,298	4,32	4	3,68	32,2	0,618
0,4	3,55	3,15	2,75	79,8	0,122	4,4	4	3,6	62,8	0,250	5,4	5	4,6	50,3	0,488
0,5	4,5	4	3,5	123	0,102	5,5	5	4,5	98,2	0,200	6,5	6,3	5,8	77,9	0,400
0,63	5,63	5	4,37	196	0,079	6,93	6,3	5,67	158	0,159	8,63	8	7,37	123	0,325
0,8	7,1	6,3	5,5	319	0,061	8,8	8	7,2	251	0,125	10,8	10	9,2	201	0,244
1	9	8	7	491	0,048	11	10	9	398	0,100	13,5	12,5	11,5	314	0,187
1,25	11,25	10	8,75	767	0,040	13,75	12,5	11,25	614	0,800					$c_{01}$ kg
1,6	14,1	12,5	10,9	129	0,285	17,6	16	14,4	1,01	0,625					$c_{01}$ kg
2	18	16	14	196	0,256	22	20	18	1,57	0,500					$c_{01}$ kg
2,5	22,5	20	17,5	3,07	0,205	27,5	25	22,5	2,45	0,400					$c_{01}$ kg
3,2	28,2	25	21,8	5,15	1,49	34,7	31,5	28,3	4,09	2,98					$c_{01}$ kg
4	35,5	31,5	29,5	7,98	1,22	44	40	36	6,28	2,50					$c_{01}$ kg
5	45	40	35	12,3	1,02	55	50	45	9,82	2,00					$c_{01}$ kg
6,3	56,3	50	43,7	19,6	0,793	69,3	63	56,7	15,8	1,58					$c_{01}$ kg
8	71	63	55	31,9	6,10										$c_{100}$ kg
10	90	80	70	49,1	5,12										$c_{100}$ kg
12,5	112,5	100	87,5	76,7	4,10										$c_{100}$ kg
16	141	125	109	129	2,45										$c_{100}$ kg
Drahtdurchmesser d	Berechnungsgrundlagen:														
	Formverhältnis $\frac{D_m}{d} \approx 16$														
	$D_a$	$D_m$	$D_1$	$P_{1000}$	c										
0,2	3,35	3,15	2,95	9,97	1,95										
0,25	4,25	4	3,75	15,3	1,64										
0,32	5,32	5	4,68	25,7	1,19										
0,4	6,7	6,3	5,9	39,9	0,977										
$1. \tau = \frac{8}{\pi} \left( \frac{D_m}{d} \right)^3 \cdot P$ in $\frac{1}{\text{cm}^2}$ wenn d in mm $\tau$ in $\frac{1}{\text{kg}/\text{mm}^2}$ wenn d in mm Zu dieser Spannung tritt ein Zuschlag infolge der Krümmung der Gänge (siehe Rechentafel). $2. P_{1000}$ = Federkraft bei $\tau = 1000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ bzw. $10 \text{ kg}/\text{mm}^2$ , angeben in g bei d von 0,2 bis 1 mm, in kg bei d über 1 mm $3. f = \frac{P}{G} = \frac{8}{G} \left( \frac{D_m}{d} \right)^3 \cdot \frac{P}{d}$ f = Federung je Windung in cm P = Gesamtfederung in cm G = Gleitmodul in $\text{kg}/\text{cm}^2$ $4. c = \frac{f}{P}$ = Federung in cm je Windung für die Kräfteinheit, gerechnet mit $G = 800000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ und zwar: Kräfteinheit $P = 0,1$ 1 10 100 kg Bezeichnung $c = c_{01}$ $c_1$ $c_{10}$ $c_{100}$ cm															
5. Januar 1933															

Bild 6.2: Erster Entwurf einer Norm zu Schraubenspedern vom Januar 1933 (3. Seite)

### 6.3.2 Normen zu Federwerkstoffen und Halbzeugen

Was die Materialnormung der Halbzeuge (Federdrähte und -bänder) für Federn anbelangt, bestand Anfang der 1930er Jahre nur das Normblatt DIN 177 Stahldraht (Eisendraht). Die für die Herstellung von Federn benötigten Drähte waren in DIN 177 nicht enthalten. Somit war die Erarbeitung einer Drahtnorm für Federn unerlässlich, was auch in einem Antrag an den AF gefordert wurde.

Im Juni 1933 konnten dann die Drahtnormen

DIN E 2076 Federstahldraht, gezogen, gewalzt und  
DIN E 2077 Stahldraht (Eisendraht), gezogen

veröffentlicht werden [6.6]. **Bild 6.3** zeigt jeweils die erste Seite dieser Normen.

In den DIN-Mitteilungen vom April 1937 [6.7] unterrichtete Prof. *Kutzbach* die interessierten Kreise über die neue Abfassung der Entwürfe DIN E 2076 und DIN E 2077 aufgrund der eingegangenen Änderungswünsche aus der Industrie.

Nach Einarbeitung der Einsprüche erfolgte im Oktober 1937 die Neuauflage der beiden Normblätter unter geänderten Titeln

DIN 2076 Federstahldraht rund, patentiert gehärtet, federhart gezogen und  
DIN 2077 Federstahldraht rund, gewalzt.

Der Deutsche Federnverband (1926 entstanden als „Deutsche Federn-Verband GmbH“, Bochum, siehe auch Kapitel 7) wie auch die Stahldrahtvereinigung e.V. waren die Mitträger dieser Normenausgaben.

### 6.3.3 Normen für Blattfedern und Zubehör

Der Arbeitsausschuss Federn arbeitete nicht allein an Normen für die Federindustrie. Da insbesondere Blattfedern vor allem in geschichteter Anordnung schon seit Jahrzehnten in der Fahrzeugtechnik eingesetzt wurden, sind diese Federn mit Zubehör (Klammern, Beilagen ...) bezüglich der Normung vom Fachnormenausschuss der Kraftfahrindustrie (FAKRA) und anderen Ausschüssen der Fahrzeugtechnik erarbeitet worden. Sie erhielten in den ersten Ausgaben deshalb auch den Zusatz „KrW“ bei der DIN-Nummer. Bei dieser Normungsarbeit auf dem Gebiet der Blattfedern und des Zubehörs wirkte auch der Deutsche Federnverband mit.

Anwendung des noch nicht endgültigen Entwurfs auf eigene Gefahr

<b>Federstahl draht</b> gezogen gewalzt		<b>DIN</b> ENTWURF 1 E 2076			
DK 669.1-42					
(Erläuterungen siehe Seite N 45)					
<b>Einspruchsfrist 1. August 1933</b> Alle Zuschriften doppelt erbeten					
Bezeichnung für Federstahl draht von 5 mm Durchmesser. Ausführung ..... aus ..... <sup>1)</sup> Federstahl draht 5 DIN 2076 ..... <sup>2)</sup>					
Durchmesser					
Nennmaß mm	Zulässige Abweichungen mm		Querschnitt mm <sup>2</sup>	Gewicht <sup>3)</sup> kg/1000 m	
	gezogen	gewalzt			
0,2	±0,015		0,0314	0,247	
0,22		0,0380	0,298		
0,25		0,0491	0,385		
0,28		0,0616	0,483		
0,32	±0,02		0,0804	0,631	
0,36		0,102	0,799		
0,4		0,125	0,986		
0,45		0,159	1,25		
0,5		0,196	1,54		
0,56		0,246	1,93		
0,63		0,312	2,45		
0,7		0,385	3,02		
0,8		±0,03		0,503	3,95
0,9			0,636	4,99	
1	0,785		6,17		
1,1	0,950		7,46		
1,4	±0,04		1,54	12,1	
1,6			2,01	15,8	
1,8	±0,06		2,54	20,0	
2			3,14	24,7	
2,25	±0,08		3,38	31,2	
2,5			4,91	38,5	
2,8		6,16	48,3		
3,2		8,04	63,1		
3,6	±0,10	10,2	79,9		
4		12,6	98,6		
4,5		15,9	125		
5		19,6	154		
5,6	±0,10	±0,15	24,6	193	
6,3			31,2	245	
7			38,5	302	
8			50,3	395	
9			65,6	499	
10			78,5	617	
11			95	746	
12,5			±0,20	123	963
14				154	1210
16				201	1580
18	254	2000			
20	314	2470			
22,5	±0,30	398	3120		
25		491	3850		
28		616	4830		
32		804	6310		
36	±0,40	1020	7990		
40		1260	9860		

<sup>1)</sup> Ausführung: Drähte von 0,2 bis 10 mm Durchmesser gezogen.  
Drähte von 5 bis 40 mm Durchmesser gewalzt.  
Bei Drähten von 5 bis 10 mm Durchmesser ist die gewünschte Ausführung bei Bestellung anzugeben.

<sup>2)</sup> Werkstoff: Flußstahl; Werkstoffeigenschaften bei Bestellung angeben.

<sup>3)</sup> Gerechnet mit einem Gewicht von 7,85 kg/dm<sup>3</sup>

Lieferart: gezogener Draht in Ringen  
gewalzter Draht bis ... mm Durchmesser in Ringen, darüber in Stangen.

Juni 1933

Anwendung des noch nicht endgültigen Entwurfs auf eigene Gefahr

<b>Stahl draht (Eisendraht)</b> gezogen		<b>DIN</b> ENTWURF 1 E 2077				
DK 669.1-42						
(Erläuterungen siehe Seite N 45)						
<b>Ersatz für DIN 177</b>						
Bezeichnung für Stahl draht (Eisendraht) von 5 mm Durchmesser. Ausführung ..... <sup>1)</sup> Stahl draht 5 DIN 2077 ..... <sup>3)</sup>						
Nennmaß mm	Zulässige Abweichungen mm	Querschnitt mm <sup>2</sup>	Gewicht <sup>4)</sup> kg/1000 m			
				blank gezogen verzinnt	ver- zinkt <sup>2)</sup>	
0,10	±0,005	±0,01	0,00785	0,0617		
0,12			0,0113	0,0888		
0,14	±0,01	±0,015	0,0154	0,121		
0,16			0,0201	0,158		
0,18			0,0254	0,200		
0,2			0,0314	0,247		
0,22	±0,015	±0,02	0,0380	0,298		
0,24			0,0452	0,356		
0,26			0,0531	0,411		
0,28			0,0616	0,483		
0,31			±0,02	±0,03	0,0755	0,592
0,34					0,0908	0,713
0,37					0,108	0,844
0,4					0,126	0,986
0,45			±0,02	±0,04	0,159	1,25
0,5					0,196	1,54
0,55	0,238	1,87				
0,6	0,283	2,22				
0,7	0,385	3,02				
0,8	±0,03	±0,05			0,503	3,95
0,9					0,636	4,99
1	±0,03	±0,05			0,785	6,17
1,1					0,950	7,46
1,2					1,13	8,88
1,3			1,33	10,4		
1,4	±0,04	±0,06	1,54	12,1		
1,6			2,01	15,8		
1,8			2,54	20,0		
2			3,14	24,7		
2,2	±0,08	±0,10	3,80	29,8		
2,5			4,91	38,5		
2,8			6,16	48,3		
3,1			7,55	59,2		
3,4	±0,10	±0,12	9,08	71,3		
3,6			11,3	89,0		
3,8			13,9	109		
4,2			16,6	130		
4,6			19,6	154		
5			±0,10	±0,15	23,8	187
5,5					28,3	222
6					33,2	260
7					38,5	302
7,5			±0,10	±0,15	45,4	356
8,2	52,8	415				
8,8	60,8	477				
9,4	69,4	545				
10			78,5	617		

<sup>1)</sup> Für Zwischendurchmesser gelten die zulässigen Abweichungen des in der Zahlenliste angegebenen nächst größeren Durchmessers. Eine etwa vorhandene Unrundheit muß innerhalb der für den betreffenden Durchmesser festgelegten zulässigen Abweichung liegen.

<sup>2)</sup> Über diese Toleranzen hinaus sind unwesentliche Verdickungen oder Unrundheiten, die beim Verzinken nicht ganz zu vermeiden sind, auf kurzen Längen zulässig.

<sup>3)</sup> Ausführung (bei Bestellung angeben):  
blank  
gezogen  
verkopft  
verzinkt

Werkstoff: Flußstahl

<sup>4)</sup> Gerechnet mit einem Gewicht von 7,85 kg/dm<sup>3</sup>

Lieferart: in Ringen  
Federstahl draht, gezogen, gewalzt siehe DIN 2076  
Sulfdraht gezogen siehe DIN 9078  
Kratzendraht siehe DIN TEX 4107

Juni 1933

Bild 6.3: Erste Federdrahtnormen aus dem Jahr 1933



Anwendung des noch nicht endgültigen Entwurfs auf eigene Gefahr

## Gerippter Federstahl

gewalzt

DK 625.2.012.85 : 029.113.012.85

(Erläuterungen siehe Seite N 57)

Neuentwurf zu

**DIN**

1570

Blatt 1

Maße in mm

**Einspruchsfrist 1. August 1938**

Alle Zuschriften doppelt erbeten

Bezeichnung für gerippten Federstahl von Breite  $b = 90$  mm und Dicke  $h = 13$  mm, aus . . . . .):  
**Gerippter Federstahl 90 x 13 DIN 1570 . . . . .)**

Bestellbeispiel (für Einkauf) für 1000 kg<sup>1)</sup> gerippten Federstahl 90 x 13 DIN 1570 aus Si 516<sup>2)</sup> von 5 m<sup>3)</sup> Länge:  
**1000 kg<sup>4)</sup> Gerippter Federstahl 90 x 13 DIN 1570 Si 516<sup>2)</sup> Länge 5 m<sup>3)</sup>**

Dicke h	6 - 0,3	(7 - 0,3)	8 - 0,3	(9 - 0,3)	10 - 0,3	13 - 0,4	16 - 0,5	(20 - 0,6)
Kleinstdmaß $F_1$	3,75	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Größtmaß $F_2$	3	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75

Breite b	G = Gewicht in kg/m, gerechnet mit 7,85 kg/dm <sup>3</sup> W = Widerstandsmoment in cm <sup>4</sup> , nur für den glatten Rechteckquerschnitt ohne Berücksichtigung der Rippen und Rillen berechnet														
	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	
50 - 0,3	<b>2,27</b>	0,300	2,56	0,408	<b>3,05</b>	0,534	3,44	0,675	<b>3,84</b>	0,835					
(55 - 0,3)	2,50	0,330	2,93	0,450	3,36	0,588	3,80	0,742	4,23	0,917					
60 - 0,5	<b>2,74</b>	0,360	3,21	0,490	<b>3,68</b>	0,640	4,15	0,810	<b>4,62</b>	1,00	<b>6,03</b>	1,69			
(65 - 0,5)	2,97	0,390	3,44	0,532	3,99	0,694	4,42	0,878	5,01	1,08	6,54	1,83			
70 - 0,6	<b>3,21</b>	0,420	3,75	0,572	<b>4,31</b>	0,747	4,85	0,945	<b>5,41</b>	1,17	<b>7,05</b>	1,97			
(80 - 0,6)	3,68	0,480	4,30	0,653	4,93	0,854	5,56	1,08	6,19	1,33	8,07	2,25	9,95	3,42	
90 - 0,7			4,85	0,735	<b>5,56</b>	0,960	(6,27 <sup>1)</sup> )	1,21	<b>6,98</b>	1,50	<b>9,00</b>	2,53	<b>11,2</b>	<b>3,84</b>	
(100 - 0,8)			5,40 <sup>1)</sup>	0,816	6,19	1,07	6,98	1,25	7,76	1,66	11,1	2,81	12,5	4,26	
(105 - 0,8)			5,60 <sup>1)</sup>	0,858											
120 - 1							1,62	<b>9,33</b>	2,00	<b>12,1</b>	3,38	<b>15,0</b>	5,12	18,0	8,00

	Reichsbahngrößen für Eisenbahnwagen	}	für Federstahl R <sup>5)</sup>
	Reichsbahngrößen für Dampflokomotiven		
	Reichsbahngrößen für elektrische Lokomotiven		

Eingeklammerte Größen möglichst vermeiden, fett gedruckte bevorzugen.

<sup>1)</sup> Bei der Deutschen Reichsbahn nur gültig für vorhandene Fahrzeuge.

<sup>2)</sup> Bei der Deutschen Reichsbahn nur gültig für Wiegenfedern dreischiger Drehgestelle amerikanischer Bauart. Die Federn haben keine Mittelwagen.

<sup>3)</sup> Für die Deutsche Reichsbahn gilt Federstahl aus Si 516; er ist mit der besonderen Kennzeichnungsritze E zu versehen und erhält in der Berechnung den Zusatz R, z. B.:  
**Gerippter Federstahl R 90 x 13 DIN 1570 . . . . .)**

<sup>4)</sup> Menge (bei Bestellung angeben): . . . . . kg (Gewicht); . . . . . Stück (Stückzahl)

<sup>5)</sup> Werkstoff (bei Bestellung angeben, siehe auch DIN 1570 Blatt 2): Si 516 (für Reichsbahn) Si 616

<sup>6)</sup> Länge (bei Bestellung angeben):

Bestell- angabe	Lieferart für Einzellängen	Längen- abmaße mm	Abmaße für Gerätteile der Stäbe
keine	in Walzlängen 4 bis 7 m nach Wahl des Lieferers	—	—
Länge . . . . . m	in festen Längen bis zu 7 m	$\pm 10^1$ )	 Die Stäbe müssen derart gerichtet sein, daß die Hochkantabweichung $h_1$ von der Geraden höchstens 0,15% der Länge $l$ beträgt.

<sup>7)</sup> Soll die Toleranz 20 mm einseitig nach plus oder minus liegen, so ist dies bei Bestellung anzugeben, z. B.: Länge 5 m + 20 mm.

Unterrängen (kleinste Unterlänge 1,5 m) dürfen bis zu 10% der Gesamtlänge mitgeliefert werden, wenn in der Bestellung nicht besonders „ohne Unterrängen“ vermerkt ist.

Kennzeichnung: In den an die Deutsche Reichsbahn zu liefernden Federstahl sind der Name des Lieferers oder das Firmenzeichen und das Jahr der Lieferung (z. B.: N.N.38) an einem Ende einzupressen.

Allgemeiner Wagen-Normenausschuß (AWANA)  
 Lokomotiv-Normenausschuß (LONA)  
 Fachnormenausschuß der Kraftfahrindustrie (FAKRA)  
 Deutscher Federn-Verband

Juni 1938

**Bild 6.4:** Normblatt „Gerippter Federstahl“ in der Ausgabe des Neuentwurfs von 1938

Ein Dokument, das diese Zusammenarbeit beweist, ist der in **Bild 6.4** dargestellte Neuentwurf von **DIN** 1570 Gerippter Federstahl, gewalzt in der Ausgabe von Juni 1938 [6.8]. Neben dem Deutschen Federnverband waren noch als Mitherausgeber der

- Allgemeiner Wagen-Normenausschuss (AWANA), der
- Lokomotiv-Normenausschuss (LONA) und der
- Fachnormenausschuss der Kraftfahrindustrie (FAKRA)

beteiligt. In der Vorauskabe **DIN** 1570 vom Juni 1930 [6.9] war nur der Deutsche Federnverband als Herausgeber aufgeführt, während der allgemeine Wagen-Normenausschuss, der Allgemeine Lokomotiv-Normenausschuss und die Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft dem Normeninhalte in unterschiedlich datierten Schriftstücken (Briefen) zustimmten.

## 6.4 Die deutsche Normungsarbeit in der Mitte des 20. Jahrhunderts

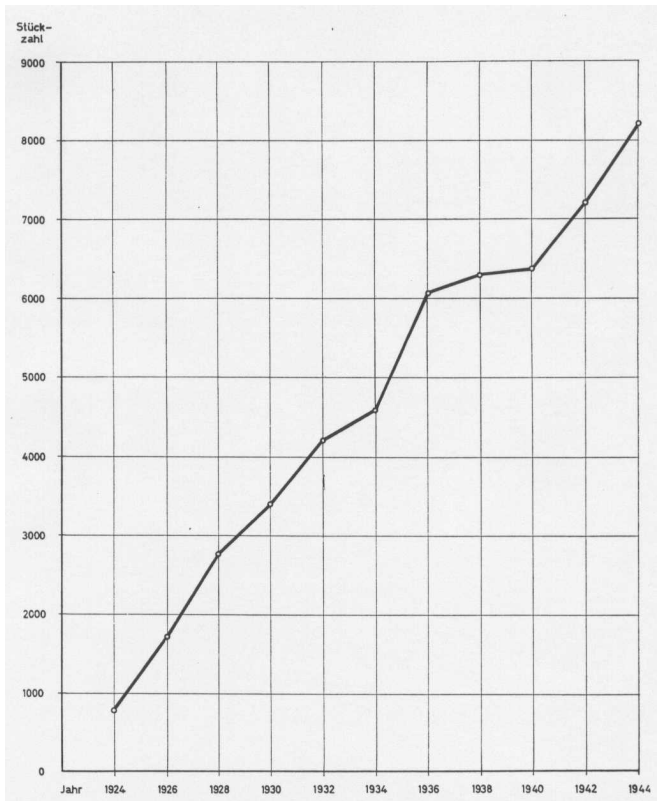
Nicht nur die Wirtschaft, auch die Normung wurde von den politischen Verhältnissen zwischen 1933 und 1945, insbesondere während des 2. Weltkriegs, beeinträchtigt. Die Verknappung der Ressourcen brachte es mit sich, dass die Normen, besonders bei den Werkstoffen, den neuen Gegebenheiten angepasst werden mussten. Diese Anpassung geschah durch sogenannte Umstellungsnormen, bei denen der Großbuchstabe U vor die Normblattnummer gesetzt wurde. Die Entwicklung, die das Deutsche Normenwerk bis zum Ende des 2. Weltkrieges genommen hat, dargestellt durch die Stückzahlen der jeweils zu Beginn eines Jahres vorhandenen bezugsfertigen Normblätter, zeigt die Grafik in **Bild 6.5**.

Von den Kriegseinwirkungen im Zuge des 2. Weltkrieges blieb auch die deutsche Normungsarbeit nicht verschont. 1943 wurden die Geschäftsräume des Deutschen Normenausschusses durch einen Luftangriff auf Berlin zerstört. Eine Folge des Angriffs war der Verlust des Archivs, der Bücherei und der Geschäftsakten.

Mit der Einnahme von Berlin und dem Ende der Kriegshandlungen kam es zur Neuordnung der Normung. Den Neustart dokumentieren die in den **Bildern 6.6** und **6.7** enthaltenen Schreiben vom 31. Dezember 1946 und 6. Februar 1947 [6.1].

In den ersten Jahren nach dem 2. Weltkrieg erschienen anstelle der DIN-Mitteilungen die sogenannten „Mitteilungen aus der deutschen Normung“.

Neben anderen Mitteilungen wird in der dritten Ausgabe Mai 1947 [6.10] der Tod von Prof. Dr. *Karl Kutzbach* (1875 – 1942) bekannt gegeben. Als Nachfolger für den verstorbenen Obmann des AF wird das langjährige Mitglied dieses Ausschusses, Herr Dr.-Ing. *Helmuth Stark* vom Institut für Mechanik der TU Berlin benannt.



**Bild 6.5:** Die Entwicklung des Deutschen Normenwerkes bis 1944

ALLIED CONTROL AUTHORITY  
DIRECTORATE OF ECONOMICS  
INDUSTRY COMMITTEE

WORKING PARTY ON THE GERMAN STANDARDS ASSOCIATION (DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS)

SUBJECT: Operation of German Standards Association


TO : German Standards Association (Deutscher Normenausschuss)

Attn: Dr. Frank, Acting Manager

1. The Directorate of Economics of the Allied Control Authority has agreed that the German Standards Association (Deutscher Normenausschuss) be permitted to operate.

2. The necessary measures of control are being investigated and the German Standards Association (Deutscher Normenausschuss) will be informed as to these measures of control as soon after their adoption as possible.

FOR THE WORKING PARTY ON THE GERMAN STANDARDS ASSOCIATION



31 December, 1946.

**Bild 6.6:** Der Alliierte Kontrollrat erteilt mit diesem Schreiben dem Deutschen Normenausschuss die Erlaubnis zur Wiederaufnahme der deutschen Normungsarbeit

BY HAND

Economics Branch  
 HQ Military Government  
 British Troops BERLIN  
 Reichskanzlerplatz  
 Berlin-Charlottenburg 9

06/1430

6 Feb 47

Deutscher Normenausschuss  
 BERLIN-CHARLOTTENBURG, W 15  
 Uhlandstr. 175

Please find enclosed a letter from the Directorate of Economics of the Allied Control Authority giving official Quadripartite permission for the DNA to continue to operate. It is signed by the US Member who was Chairman at the time the decision was taken.

Will you please acknowledge receipt of this letter which you should keep for future reference.



(M. V. FLETCHER) Lt Col  
 Colonel Economics

Tele: 32-5151  
 Extn: 228  
 MVF/iba

Time of Signature 0705 A hrs

Copy to : Research Branch  
 ECOSC (BE)  
 BERLIN.

Abteilung fuer Wirtschaft  
 Magistrat von Gross-Berlin  
 (with copy of ACA letter referred to)

**Bild 6.7:** Die britische Militärregierung übermittelte mit dem hier abgebildeten Schreiben an den Deutschen Normenausschuss die Erlaubnis des Alliierten Kontrollrats, die Arbeit fortzusetzen

Der AF verabschiedet vier Normen zu Federn, die Federberechnungen enthalten. Es sind die bereits in Tafel 5.2 aufgeführten Normen

**DIN** 2088 Gewundene Biegefeder, Ausgabe Juli 1949,

**DIN** 2089 Zylindrische Schraubenfedern mit Kreisquerschnitt, Ausgabe Januar 1948,

**DIN** 2090 Zylindrische Schraubendruckfeder aus Vierkantstahl, Ausgabe Januar 1948,

**DIN** 2091 Drehstabfeder, Ausgabe Januar 1948,

die auch in der 12. Auflage 1953 des DIN-Taschenbuches 1 abgedruckt wurden [6.18].

Die Entwürfe **DIN** 2075 und **DIN** 2077 wurden weiterbearbeitet. Sie erschienen in den Jahren 1947 und 1948.

Weiterhin wurde auch ein Blatt für die fertigen Federn fertiggestellt, das neben den Abmessungen und Bezeichnungen auch Angaben über die Federung und Kräfte enthält.

Kennzeichnend für die Wirtschaftslage der Nachkriegszeit ist die Ankündigung eines Normblattverzeichnisses im April-Heft 1948 der Mitteilungen aus der Wirtschaft:

„Das Normblattverzeichnis kann beim Beuth-Vertrieb, Berlin und Krefeld-Uerdingen, bestellt werden und ist nur gegen Voreinsendung von 2 kg Altpapier erhältlich“.

Intensiv wurde unter der Leitung des Obmannes des Arbeitsausschuss Federn, Herrn Dr.-Ing. *Helmuth Stark*, in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts die Normenarbeit für Federn angegangen. In der Festschrift

### **50 Jahre Deutscher Normenausschuss**

aus dem Jahre 1967 [6.11] berichtet der Geschäftsführer des AF, Herr Dipl.-Ing. *H. Schwarz* aus der Geschäftsstelle Köln über die Normenarbeit. Danach liegen im Normenbestand des Fachgebietes Federn

- 13 DIN-Normen und
- 3 Normenentwürfe

vor. An weiteren neun DIN-Normen wird gearbeitet. Die Zusammenstellungen wie auch die Zeittafeln in den **Tafeln 6.3 bis 6.10** dokumentieren die Normenarbeit in den verschiedenen Normenausschüssen. Dabei ist zu beachten, dass diese Gliederungen in Anlehnung an die Inhaltsverzeichnisse der DIN Taschenbücher 29 [6.20] und 349 [6.21] erfolgte. Hier sind die abgedruckten Normen und Norm-Entwürfe nach Sachgebieten gelistet. Es

hat sich als vorteilhaft erwiesen, diese Gliederung für die Darstellung der Normenarbeit beizubehalten.

Die Erstauflage des DIN-Taschenbuches 29 FEDERN erschien im März 1971. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die wichtigsten Federnormen im DIN-Taschenbuch GRUNDNORMEN enthalten. Das Verzeichnis der im DIN-Taschenbuch 29 abgedruckten Normen wurde nach Sachgebieten geordnet. Dieses System der Gliederung wurde auch bei den Folgeausgaben bis zur 8. Auflage 1991 beibehalten. Danach wurde der Inhalt wegen des immer größer gewordenen Umfangs auf zwei Taschenbücher verteilt, das

DIN-Taschenbuch 29 FEDERN 1: Berechnungen, Maße, Qualitätsanforderungen, Darstellungen, Bestellangaben; Ausgabe 09/2003 und das

DIN-Taschenbuch 349 FEDERN 2: Werkstoffe, Halbzeuge; Ausgabe 02/2005.

Diese beiden Taschenbücher enthalten heute die vom Arbeitsausschuss Federn und anderen DIN-Normenausschüssen erarbeiteten Normen über Federn, Federwerkstoffe und Halbzeuge für Federn.

**Anmerkung:** In den Zeittafeln steht jeder • für eine Norm-Neuauflage. Aus Anordnungs- und Platzgründen gibt es bei der Darstellung der Tafeln geringfügige Abweichungen von der o.g. Gliederung.

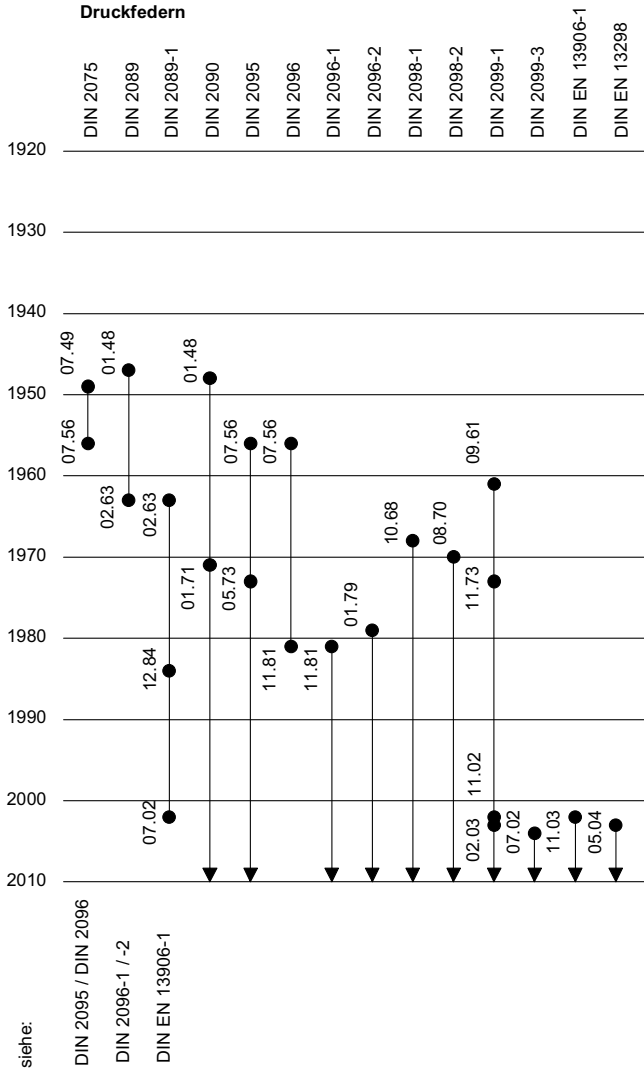
**Tafel 6.3.** Zusammenstellung der Normen über Druckfedern mit Zeittafel

Normblatt	Gültige Ausgabe	Titel	Erstausgabe
DIN 2075	—	Schraubenfedern, Druckfedern, Zugfedern, Darstellung – Ausf. - Abmaße	Juli 1949
DIN 2089	—	Zylindrische Schraubenfedern mit Kreisquerschnitt - Berechnung	Januar 1948
DIN 2089-1	—	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben – Berechnung und Konstruktion	Februar 1963

<b>Normblatt</b>	<b>Gültige Ausgabe</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
DIN 2090	Januar 1971	Zylindrische Schraubendruckfedern aus Flachstahl; Berechnung	Januar 1948
DIN 2095	April 1973	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten; Gütevorschriften für kaltgeformte Druckfedern	Juli 1956
DIN 2096	—	Schraubenfedern – Zylindrische Druckfedern aus rundgewalzten Stäben, warmgeformt – Darstellung, Ausführung, Toleranzen, Prüfung	Juli 1956
DIN 2096-1	November 1981	Zylindrische Schraubendruckfedern aus runden Drähten u. Stäben; Güteanforderung bei warmgeformten Druckfedern	November 1981
DIN 2096-2	Januar 1979	Zylindrische Schraubendruckfedern aus runden Stäben; Güteanforderungen für Großserienfertigung	Januar 1979
DIN 2098-1	Oktober 1968	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten; Baugrößen für kaltgeformte Druckfedern ab 0,5 mm Drahtdurchmesser	Oktober 1968
DIN 2098-2	August 1970	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten; Baugrößen für kaltgeformte Druckfedern unter 0,5 mm Drahtdurchmesser	August 1970
DIN 2099-1	Februar 2003	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Teil 1: Angaben für kaltgeformte Druckfedern; Vordruck A	September 1961
DIN 2099-3	Mai 2004	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Teil 3: Angaben für warmgeformte Druckfedern, Vordruck C	Mai 2004
DIN EN 13906-1	Juli 2002	Zylindrische Schraubendruckfedern aus runden Drähten und Stäben; Berechnung und Konstruktion	Juli 2002
DIN EN 13298	November 2003	Bahnanwendungen - Federungs-elemente - Schraubendruckfedern aus Stahl	November 2003



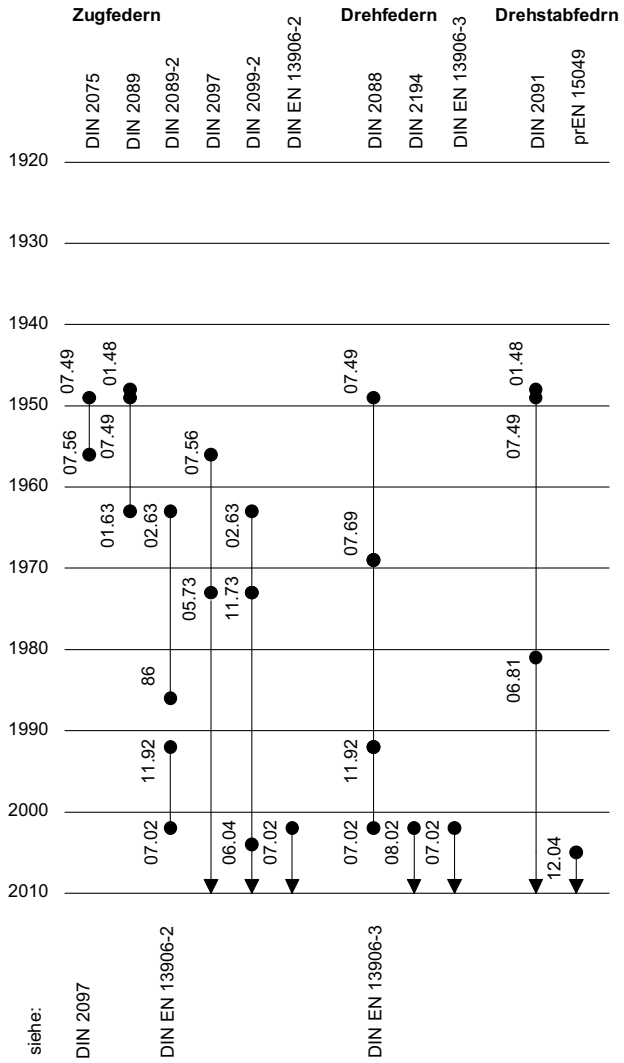
## Zeittafel für Druckfedern



**Tafel 6.4.** Zusammenstellung der Normen über Zugfedern, Drehfedern und Drehstabfedern mit Zeittafel

<b>Normblatt</b>	<b>Gültige Ausgabe</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
DIN 2075	—	Schraubenfedern, Druckfedern, Zugfedern, Darstellung – Ausführung - Abmaße	Juli 1949
DIN 2089	—	Zylindrische Schraubenfedern mit Kreisquerschnitt - Berechnung	Januar 1948
DIN 2089-2	—	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben – Teil 2: Berechnung und Konstruktion von Zugfedern	Februar 1963
DIN 2097	Mai 1973	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten; Gütevorschriften für kaltgeformte Zugfedern	Juli 1956
DIN 2099-2	Mai 2004	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Teil 2: Angaben für kaltgeformte Zugfedern, Vordruck B	Februar 1963
DIN EN 13906-2	Juli 2002	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben – Berechnung und Konstruktion - Teil 2: Zugfedern	Juli 2002
DIN 2088	—	Gewundene Biegefeder (Schenkelfeder) Berechnung	Juli 1949
DIN 2194	August 2002	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Kaltgeformte Drehfedern (Schenkelfedern) - Gütenorm	August 2002
DIN EN 13906-3	Juli 2002	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Berechnung und Konstruktion - Teil 3: Drehfedern	Juli 2002
DIN 2091	Juni 1981	Drehstabfeder mit rundem Querschnitt; Berechnung und Konstruktion	Januar 1948
prEN 15049	Dezember 2004	Bahnanwendungen – Federungs-elemente – Drehstabfedern aus Stahl	Dezember 2004

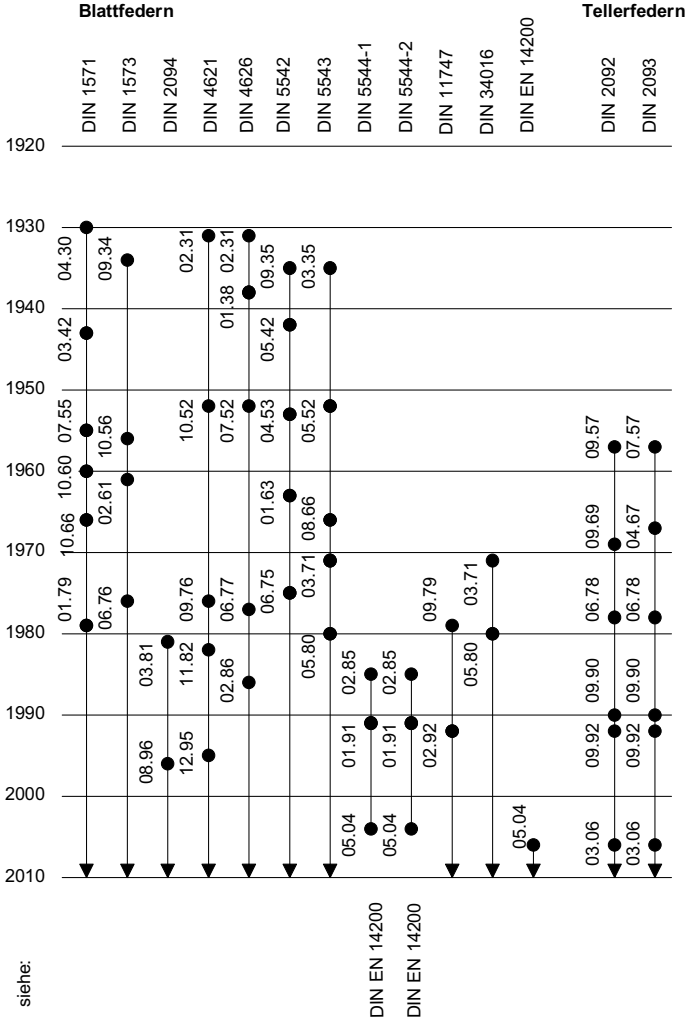
## Zeittafel für Zugfedern, Drehfedern und Drehstabfedern



**Tafel 6.5.** Zusammenstellung der Normen über Blattfedern und Tellerfedern mit Zeittafel

<b>Normblatt</b>	<b>Gültige Ausgabe</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
DIN 1571	Januar 1979	Mittenwarzen für Federblätter	April 1930
DIN 1573	Mai 1975	Beilagen und Keile für Federbünde, für Schienenfahrzeuge	September 1934
DIN 2094	August 1996	Blattfedern für Straßenfahrzeuge - Anforderungen, Prüfung	März 1981
DIN 4621	Dezember 1995	Geschichtete Blattfedern - Federklammern	Februar 1931
DIN 4626	Februar 1986	Geschichtete Blattfedern; Federschrauben	Februar 1931
DIN 5542	Juni 1975	Blattfederenden für Schienenfahrzeuge	September 1935
DIN 5543	Mai 1980	Blattfedern; Federsattelplatten, Federzwischenplatten für Federaufhängung	März 1935
DIN 5544-1	—	Parabelfedern für Schienenfahrzeuge - Hauptmaße, Ausführung, Anforderungen, Prüfung	Februar 1985
DIN 5544-2	—	Parabelfedern für Schienenfahrzeuge - Einzelteile	Februar 1985
DIN 11747	Februar 1992	Landmaschinen und Traktoren; Blattfedern für Transportanhänger; Maße	September 1979
DIN 34016	Mai 1980	Blattfedern; Federgrundplatten für Federaufhängung	März 1971
DIN EN 14200	Mai 2004	Bahnanwendungen – Federungselemente - Parabelfedern aus Stahl	Mai 2004
DIN 2092	März 2006	Tellerfedern - Berechnung	September 1957
DIN 2003	März 2006	Tellerfedern – Qualitätsanforderungen - Maße	Juli 1957

## Zeittafel für Blattfedern und Tellerfedern



**Tafel 6.6.** Zusammenstellung der Normen über sonstige Federn mit Zeittafeln zu sonstigen Federn und Teil zu Werkstoffen und Halbzeugen für Federn (Eisenwerkstoffe)

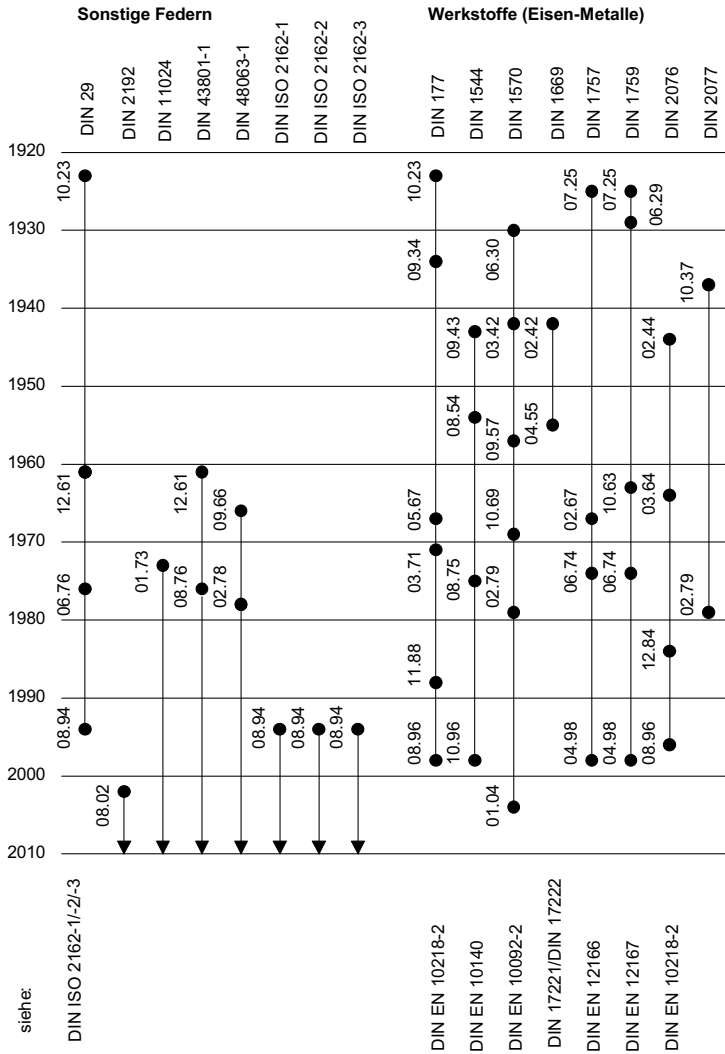
<b>Normblatt</b>	<b>Gültige Ausgabe</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
DIN 29	—	Zeichnungen; Sinnbilder für Schrauben-, Kegel-, Blatt- und Spiralfedern	Oktober 1923
DIN 2192	August 2002	Flachfedern – Güteanforder.	August 2002
DIN 11024	Januar 1973	Federstecker	Januar 1973
DIN 43801-1	August 1976	Elektrische Messgeräte; Spiralfedern, Maße	Dezember 1961
DIN 48063-1	Februar 1978	Federsplinte; Maße	Sept. 1966
DIN ISO 2162-1	August 1994	Technische Produktdokumentation - Federn - Teil 1: Vereinfachte Darstellung	August 1994
DIN ISO 2162-2	August 1994	Technische Produktdokumentation - Federn - Teil 2: Angaben für zylindrische Schraubendruckfedern	August 1994
DIN ISO 2162-3	August 1994	Technische Produktdokumentation - Federn - Teil 3: Begriffe	August 1994

**Tafel 6.7.** Zusammenstellung der Normen über Werkstoffe und Halbzeuge für Federn aus Eisenmetallen mit Zeittafel

<b>Normblatt</b>	<b>Gültige Ausgabe</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
DIN 177	—	Stahldraht (Eisendraht); gezogen	Oktober 1923
DIN 1544	—	Kaltbänder aus Stahl; Maße	September 1943
DIN 1570	—	Gerippter Federstahl; gewalzt	Juni 1930
DIN 1669	—	Federstähle für Blatt- und Kegelfedern	Februar 1942
DIN 1757	—	Messingdraht rund; gezogen, gegläht oder hart, in Ringen; handelsüblich	Juli 1925
DIN 1759	—	Flachmessing, gezogen mit scharfen Kanten, handelsüblich	Juni 1929
DIN 2076	—	Federstahldraht rund; patentiert und federhart gezogen	Februar 1944
DIN 2077	—	Federstahl rund, Drähte, Stangen, gewalzt	Oktober 1937
DIN 4620	—	Federstahl; warm gewalzt für geschichtete Blattfedern	April 1954
DIN 17221	—	Warmgeformte Stähle für Federn; Güteeigenschaften	April 1955

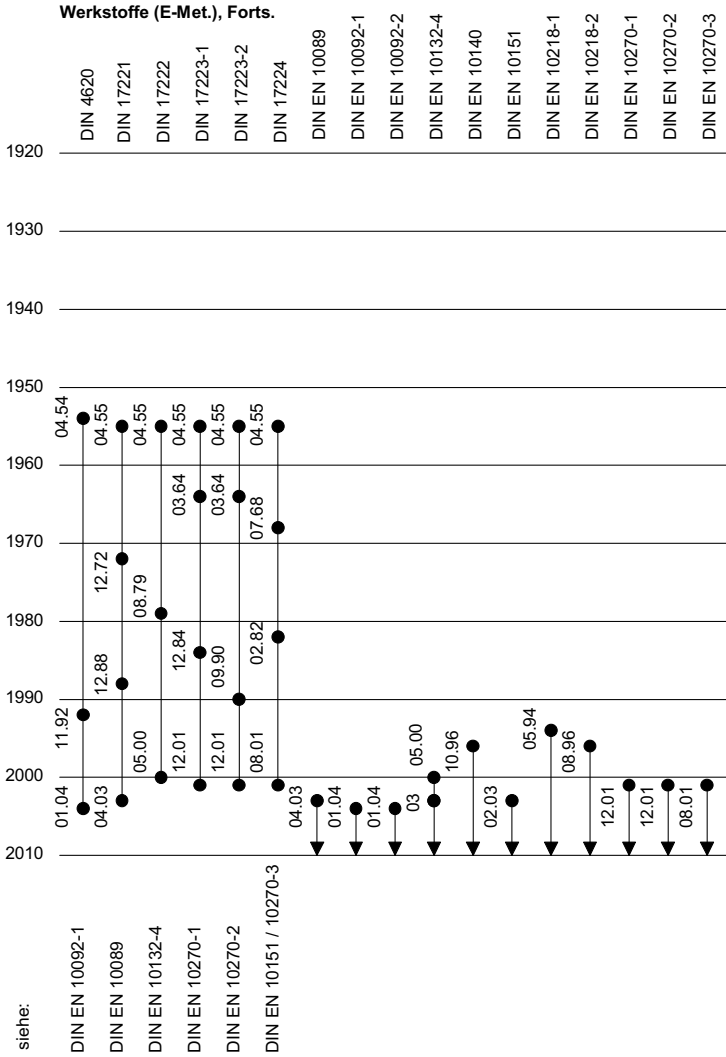
<b>Normblatt</b>	<b>Gültige Ausgabe</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
DIN 17222	—	Kaltgewalzte Stahlbänder für Federn; Güteeigenschaften	April 1955
DIN 17223-1	—	Runder Federstahldraht, Gütevorschriften; Patentiert-gezogener Federstahldraht aus unlegierten Stählen	April 1955
DIN 17223-2	—	Federstahldraht, Gütevorschriften; Vergüteter Federdraht und vergüteter Ventildraht aus unlegierten Stählen	April 1955
DIN 17224	—	Nichtrostende Stähle für Federn; Güteeigenschaften	April 1955
DIN EN 10089	April 2003	Warmgewalzte Stähle für vergütbaren Federn - Technische Lieferbedingungen	April 2003
DIN EN 10092-1	Januar 2004	Warmgewalzte Flachstäbe aus Federstahl - Teil 1: Flachstäbe - Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße	Januar 2004
DIN EN 10092-2	Januar 2004	Warmgewalzte Flachstäbe aus Federstahl - Teil 2: Gerippter Federstahl - Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße	Januar 2004
DIN EN 10132-4	April 2003	Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung - Technische Lieferbedingungen - Teil 4: Federstähle und andere Anwendungen	Mai 2000
DIN EN 10140	Oktober 1996	Kaltband - Grenzabmaße und Formtoleranzen	Oktober 1996
DIN EN 10151	Februar 2003	Federband aus nichtrostenden Stählen - Technische Lieferbedingungen	Februar 2003
DIN EN 10218-1	Mai 1994	Stahldraht und Drahterzeugnisse; Allgemeines; Teil 1: Prüfverfahren	Mai 1994
DIN EN 10218-2	August 1996	Stahldraht und Drahterzeugnisse - Allgemeines - Teil 2: Drahtmaße und Toleranzen	August 1996
DIN EN 10270-1	Dezember 2001	Stahldraht für Federn - Teil 1: Patentiert-gezogener unlegierter Federstahldraht	Dezember 2001
DIN EN 10270-2	Dezember 2001	Stahldraht für Federn - Teil 2: Ölschlussvergüteter Federstahldraht	Dezember 2001
DIN EN 10270-3	August 2001	Stahldraht für Federn - Teil 3: Nichtrostender Federstahldraht	August 2001

Zeittafel für **Sonstige Federn** und **Werkstoffe für Federn** Teil 1





Zeittafel für **Werkstoffe** und **Halbzeuge** für **Federn** Teil 2



**Tafel 6.8.** Zusammenstellung der Normen über Werkstoffe und Halbzeuge für Federn (NE-Metalle) mit Zeittafel

<b>Normblatt</b>	<b>Gültige Ausgabe</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
DIN 1774	—	Messingblech – Messingband - Messingsteifen	Dezember 1929
DIN 1777	—	Blech und Band für Federn aus Kupferlegierungen	Dezember 1929
DIN 17670-1	—	Bleche und Bänder aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen; Festigkeitseigenschaften	August 1961
DIN 17670-2	—	Bleche und Bänder aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen; Technische Lieferbedingungen	August 1961
DIN 17672-1	—	Stangen und Drähte aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen; Festigkeitseigenschaften	August 1961
DIN 17672-2	—	Stangen und Drähte aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen; Technische Lieferbedingungen	August 1961
DIN 17677-1	—	Drähte aus Kupfer und Kupfer- Knetlegierungen; Eigenschaften	Juni 1974
DIN 17677-2	—	Drähte aus Kupfer und Kupfer- Knetlegierungen; Technische Lieferbedingungen	Juni 1974
DIN 17682	—	Federdrähte aus Kupfer- Knetlegierungen; Technische Lieferbedingungen	September 1966
DIN 59145	—	Federstahl, warmgewalzt, mit halbkreisförmigen Schmalseiten, für Blattfedern; Maße, Gewich- te, zulässige Abweichungen, statische Werte	Juni 1985
DIN 59146	—	Federstahl, warmgewalzt, mit rechteckigem Querschnitt und gerundeten Kanten für Blattfe- dern; Maße, Grenzabmaße, Gewichte, statische Werte	November 1992
DIN EN 1652	März 1998	Kupfer- und Kupferlegierungen - Platten, Bleche, Bänder, Strei- fen und Ronden zur allgemeinen Verwendung	März 1998
DIN EN 1654	März 1998	Kupfer- und Kupferlegierungen - Bänder für Federn und Steck- verbinder	März 1998
DIN EN 12163	April 1998	Kupfer und Kupferlegierungen - Stangen zur allgemeinen Ver- wendung	April 1998

<b>Normblatt</b>	<b>Gültige Ausgabe</b>	<b>Titel</b>	<b>Erstausgabe</b>
DIN EN 12164	September 2000	Kupfer und Kupferlegierungen - Stangen für die spanende Bearbeitung	April 1998
DIN EN 12165	April 1998	Kupfer und Kupferlegierungen - Vormaterial für Schmiedestücke	April 1998
DIN EN 12166	April 1998	Kupfer und Kupferlegierungen - Drähte zur allgemeinen Verwendung	April 1998
DIN EN 12167	April 1998	Kupfer und Kupferlegierungen - Profile und Rechteckstangen zur allgemeinen Verwendung	April 1998

## **6.5 Europäische und internationale Normungsarbeit im VDFI**

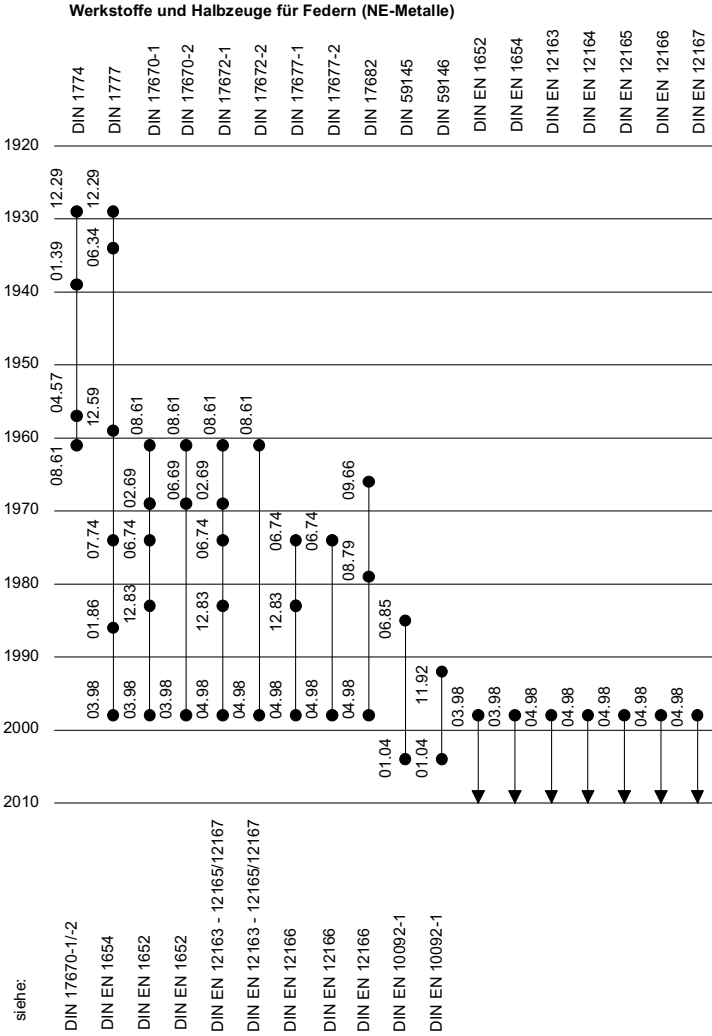
Mit dem Gedanken der Gründung eines europäischen Federnverbandes war die Schaffung von einheitlich gültigen europäischen Normen verbunden. Verwirklicht wurde dieser Gedanke mit der Gründung des European Spring Federation (ESF) am 27. Oktober 1989 unter Beteiligung der Länder Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Italien. In den Sondierungsgesprächen zur Gründung des ESF wurde im Oktober 1988 eine Arbeitsteilung beschlossen. Der Verband der Deutschen Federnindustrie (VDFI) sollte die europäische Normungsarbeit übernehmen.

Nach Verabschiedung der ESF-Satzung und der Aufnahme der Länder Finnland, Österreich und Schweden wurde in der 8. Vorstandssitzung am 22.10.1993 die Richtschnur für die anzugehende europäische Normungsarbeit vorgegeben. Danach sollten in der 1. Stufe die deutschen Berechnungsnormen für Druck-, Zug- und Schenkelfedern unter Berücksichtigung nationaler Standards der ESF-Verbandsmitglieder in europäische Normen umgewandelt werden.

Diese Vorgabe erwies sich als problematisch, weil kein europäisches Sekretariat für die Federnormung bestand.

Mit der Berufung von Herrn *Robert Hendrickx* als Geschäftsführer des ESF im Juli 1995 wurde ein Weg gefunden, die europäische Federnormung unter Umgehung der Regularien des European Committee for Standardization (CEN) trotzdem genehmigt zu bekommen.

Zeittafel für **Werkstoffe und Halbzeuge für Federn (NE-Metalle)**



**Anmerkung:** Jeder • steht für eine Norm-Neuausgabe

Unter Beteiligung von Fachleuten der Länder Deutschland, Frankreich, Großbritannien und Belgien konnten die drei sprachgleichen Fassungen (deutsch, englisch, französisch) von

- EN 13906-1: Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Berechnung und Konstruktion - Teil 1: Druckfedern
- EN 13906-2: Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Berechnung und Konstruktion - Teil 2: Zugfedern
- EN 13906-3: Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Berechnung und Konstruktion - Teil 3: Drehfedern

im Juli 2002 veröffentlicht werden.

Parallel zu dieser Normenarbeit wurden die für die europäische Federnindustrie benötigten Stahldrahtsorten genormt. Das zuständige deutsche Normungsgremium war der Unterausschuss 08/4 des Normenausschusses Eisen und Stahl (FES) unter Mitarbeit des VDFI. Als Ergebnis der Arbeit wurden im Jahr 2001 die Normen

- EN 10270-1: Stahldraht für Federn - Teil 1: Patentiert-gezogener unlegierter Federstahldraht
- EN 10270-2: Stahldraht für Federn - Teil 2: Ölschlussvergüteter Federstahldraht
- EN 10270-3: Stahldraht für Federn - Teil 3: Nichtrostender Federstahldraht

herausgegeben. Bei dieser Normenarbeit wurde darauf geachtet, dass die Inhalte der bekannten DIN-Normen 17223-1, 17223-2 und 17224 übernommen bzw. aktualisiert wurden. Die DIN 17224 legte die Normwerte für nichtrostenden Federdraht und nichtrostendes Federband fest. Mit der teilweisen Zurückziehung von DIN 17224 wegen der Herausgabe von EN 10270-3 musste für nichtrostende Federstahlbänder eine neue Normausgabe erarbeitet werden.

Im Februar 2003 wurde die Norm

- EN 10151: Federband aus nichtrostenden Stählen - Technische Lieferbedingungen

herausgegeben. Bearbeitet wurde diese Norm im UA 06/2 des FES unter Beteiligung des VDFI und seiner Verbandsmitglieder.

Die DIN 17222 mit Ausgabe August 1979 stand Pate für die Neufassungen von

- EN 10132-1: Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung - Technische Lieferbedingungen – Teil 1: Allgemeines
- EN 10132-4: Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung - Technische Lieferbedingungen – Teil 4: Federstähle und andere Anwendungen

die im April bzw. Mai 2000 erschienen. Das zuständige Normungsgremium war der Unterausschuss 05/01 des Normenausschusses Eisen und Stahl (FES).

Aufbauend auf die europäische Normung von warmgewalzten Stählen für vergütbare Federn

- EN 10089: Warmgewalzte Stähle für vergütbaren Federn - Technische Lieferbedingungen
- EN 10092-1: Warmgewalzte Flachstäbe aus Federstahl - Teil 1: Flachstäbe - Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße
- EN 10092-2: Warmgewalzte Flachstäbe aus Federstahl - Teil 2: Gerippter Federstahl - Maße, Formtoleranzen und Grenzabmaße

unter maßgeblicher Beteiligung der VDFI-Arbeitsgruppen AG 2 „Blattfedern“ und AG 3 „Werkstoffe“ in den Normungsgremien des FES UA 05/3 und 21/4 wurden die Normungsarbeiten für Schienenfahrzeuge im VDFI geleistet. Der WG 14 „Stahl-Federn“ im CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“, SC 2 „Radsätze/Drehgestelle“ steht als Obmann *Manfred Plitzko* vor. Die vom Normenausschuss Schienenfahrzeuge (FSF) veröffentlichten Normen sind

- EN 13298: Bahnanwendungen - Federungselemente - Schraubendruckfedern aus Stahl (Ausgabe 2003-11)
- EN 14200: Bahnanwendungen - Federungselemente - Parabelfedern aus Stahl (Ausgabe 2004-05)
- prEN 15049: Bahnanwendungen - Federungselemente - Drehstabfedern aus Stahl (Ausgabe 2004-12)

Von internationaler Bedeutung sind die Normausgaben der ISO 8458 „Stahldraht für Federn“

Teil 1:	Allgemeine Anforderungen
Teil 2:	Patentiert-gezogener unlegierter Federstahldraht
Teil 3:	Ölschlussvergüteter Federstahldraht

Die Normausgaben wurden im ISO/TC 17 „Steel“ Subcommittee SC 17 „Steel wire and wire products“, das von China gehalten wird, erarbeitet. Auf der Grundlage von EN 10270-1 und 2 entstanden diese ISO-Neuausgaben. Das nationale Spiegelgremium wurde aus Fachleuten der Stahl- und Federnindustrie sowie der vom FES geleiteten Unterausschüsse UA 08/2 und UA 08/4 gebildet.

National ist der Ausschuss Federn (AF) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. für die Normenbearbeitung zuständig. Da es kein europäisches Sekretariat für die Federnormung gab, war es sinnvoll, die Gründung eines internationalen Normenausschusses (ISO/TC) zu unterstützen. Das ISO/TC 227 Sekretariat wurde im November 2004 gegründet.

Die Gründung erfolgte durch die Resolution 83/2004 vom Technical Management Board (TMB) der ISO-Organisation. Das Sekretariat wird von der japanischen Normungsorganisation (JISC) gehalten. Die stimmberechtigten Mitglieder sind China, England, Frankreich, Deutschland, Japan, Italien und Korea.

## 6.6 Technische Güte- und Lieferbedingungen (TGL) – DDR-Standards

Das Normwesen des nach dem 2. Weltkrieg geteilten Deutschlands hat sich unterschiedlich entwickelt bzw. weiterentwickelt. Technische Regelwerke werden von unterschiedlichen Organisationen wie z. B. DIN, VDI, TÜV in der BRD herausgegeben.

Auf dem Gebiet der DDR gab es ein eigenständiges Normwesen. Zuständig war das Amt für Standardisierung, welches am 01.11.1954 gegründet wurde. DDR-Standards wurden unter den Normzeichen TGL (Technische Güte- und Lieferbedingungen) veröffentlicht. Eine Zusammenstellung dieser Standards auf dem Gebiet der Federn zeigt **Tafel 6.9**.

Solange die DDR existierte, waren TGL's als Rechtsvorschriften verbindlich. Dieser Rechtsstatus hat sich mit der Wiedervereinigung geändert, denn in Artikel 8 des Einigungsvertrages trat mit dem Wirksamwerden des Beitritts der DDR zur BRD im Beitrittsgebiet Bundesrecht in Kraft.

**Tafel 6.9.** Zusammenstellung der TGL-Standards des Fachgebietes Federn der DDR

<b>TGL</b>	<b>letztes Ausgabedatum</b>	<b>Titel (letzte Ausgabe)</b>	<b>Erstausgabedatum</b>
16790	Dezember 1963	Federn Begriffe – mehrsprachig	Dezember 1963
18391	April 1978	Technische Federn – Druckfedern – Berechnung und Konstruktion	Februar 1967
18392	April 1978	Technische Federn – Zugfedern – Berechnung und Konstruktion	Februar 1967
18393	Februar 1967	Druck- und Zugfedern – Technische Lieferbedingungen	Dezember 1963
18393/01	Juni 1977	Technische Federn – Druckfedern kalt geformt – Technische Lieferbeding.	Dezember 1963
18393/02	Juni 1977	Technische Federn – Zugfedern kalt geformt – Technische Lieferbeding.	Dezember 1963
18393/03	Juni 1977	Technisch Federn – Druckfedern warm geformt – Technische Lieferbed.	Dezember 1963
18394	Juni 1977	Technische Federn – Druckfedern – Drahtdurchmesser 0,1 bis 0,45 mm	November 1964
18395	Juni 1977	Technische Federn – Druckfedern – Drahtdurchmesser 0,5 bis 16 mm	Juli 1967
18396	Juni 1977	Technische Federn – Zugfedern – Drahtdurchmesser 0,1 bis 0,45 mm	November 1964
18397	Juni 1977	Technische Federn. Zugfedern. $d = 0.5$ bis 16mm	Juli 1967
18398	Februar 1967	Tellerfedern – Berechnung und Konstruktion	Oktober 1963
18399	Januar 1980	Technische Federn – Tellerfedern	April 1965
18401	September 1964	Drehfedern – Berechnung und Konstruktion	September 1964
18402	September 1964	Drehfedern – Technische Lieferbed.	September 1964
18403	Juni 1980	Technische Federn – Drahtformfedern – Technische Bedingungen	September 1964
18404	September 1964	Flachformfedern – Berechnung und Konstruktion	September 1964
18405	Dezember 1985	Technische Federn – Flachformfedern – Technische Bedingungen	September 1964
20604	November 1965	Spiralfedern – Berechnung und Konstruktion	November 1965
20605	November 1965	Spiralfedern – Technische Lieferbed.	November 1965
22040	April 1984	Technische Federn – Druckfedern kalt geformt für schwingende Beanspruchung – Technische Bedingungen	Februar 1968
31665	April 1978	Drahtformfedern – Sprengringe für Wellen aus Runddraht	Dezember 1968



Aufgrund von Artikel 8 in Verbindung mit Artikel 9 des Einigungsvertrages wurde die Rechtsverbindlichkeit von TGL's außer Kraft gesetzt. Unter diesem Aspekt ist auch die DIN-Empfehlung aus Januar 1991 zu sehen, TGL's nicht mehr anzuwenden. Die Ausarbeitung der DDR-Standards auf dem Federnegebiet erfolgte unter verantwortlicher Beteiligung des VVB Wälzlager und Normteile und den Fachbereichen 43 Standardteile, Karl-Marx-Stadt (Chemnitz). Der Rechtsstatus der TGL's wurde vom Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung, Berlin, bestätigt. Zeitverzögert trat die Verbindlichkeit in Kraft.

Bei den Berechnungsstandards TGL 18391 / 18392 gab es überwiegende Übereinstimmung mit DIN 2089 Teil 1 und 2.

Bei den Maßnormen waren Unterschiede vorhanden.

Besondere Bedeutung haben die DDR-Standards TGL 18394 bis 18397 erlangt. Die **Bilder 6.8** und **6.9** zeigen als Beispiele die jeweilige Titelseite der Standards Druckfedern und Zugfedern für die Auswahl dieser Federn mit einem Drahtdurchmesser im Bereich 0,5 bis 16 mm. In dieser Standardreihe waren Druck- und Zugfedern in ihren Abmessungen standardisiert und wurden auch in großen Stückzahlen hergestellt. Die Standards TGL 18394 und 18396 enthielten Maßtabellen für Druck- bzw. Zugfedern mit Drahtdurchmessern unter 0,5 mm (s. Tafel 6.11). Ähnliche Ziele wurden auch mit DIN 2098 Teil 1 und 2 verfolgt, die aber durch die unterschiedliche Kundenstruktur in der BRD keine besondere Bedeutung erlangte.

DK 62-272.22      **DDR-Standard**      10/38/      Juni 1977

<b>Deutsche Demokratische Republik</b>	Technische Federn <b>Druckfedern</b> Drahtdurchmesser 0,5 bis 16 mm	<b>TGL</b> <b>18395</b> Gruppe 135772
--	---	---

Технические пружины <b>Пружины сжатия</b> Проволочный диаметр 0,5 до 16 мм	Mechanical Springs <b>Compression Springs</b> Wire Diameters 0,5 to 16 mm
--	---

Deskriptoren: Druckfeder Verbindlich ab 1. 1. 1979

Dieser Standard gilt für Druckfedern aus rundem patentiert-gezogenem unlegiertem Federstahldraht für technische Federn Klassen A, B und C nach TGL 14193/01, mit Gesamtwindungszahlen von 5,5 bis 17,5 und einem Wickelverhältnis  $w \leq 18$ .

Dieser Standard gilt nicht für hauptparameter-bestimmende Druckfedern in Meß-, Steuer-, Schalt- und Regelgeräten, Kupplungen und Bremsen.

Maße in mm

Dargestellt ist Form A

Bezeichnung einer Druckfeder aus Federstahldraht Klasse B von Drahtdurchmesser  $d = 5$  mm, Außendurchmesser  $d_a = 45$  mm und Gesamtwindungszahl  $i_g = 11,5$ :

Druckfeder 95 × 45 × 11,5 TGL 18395

Für Druckfedern nach Tabelle 3 ist bis zum Drahtdurchmesser 8 mm rost- und säurebeständiger Federstahldraht X 12 Cr Ni 17,7 nach TGL 14167 zulässig.

Um die in Tabelle 3 enthaltenen Federwege zu erreichen, sind die Werte  $P_1$  bis  $P_n$  und  $c$  mit 0,9 zu multiplizieren.

Die Bezeichnung lautet dann z. B.:

Druckfeder X 12 Cr Ni 17,7-2,2 × 28 × 9,5 TGL 18395

Verantwortlich: VVB Wälzlager und Normteile, Karl-Marx-Stadt      Fortsetzung Seite 2 bis 16  
 Bestätigt: 30. 6. 1977, Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung, Berlin

(143) Unternr. 351 - 0 41, 35 51 46      Verlag: Staatserziehung der DDR, Institut für Meß- und Regel-Standardisierung der DDR, Bereich Standardisierung, 701 Leipzig, Postfach 1044

**Bild 6.8:** Standard-Titelblatt zur Auswahltabelle von Druckfedern mit  $d = 0,5$  bis 16 mm

DK 62-272.22		DDR-Standard		1391	Juni 1977
<b>Deutsche Demokratische Republik</b>		<b>Technische Federn Zugfedern</b> Drahtdurchmesser 0,5 bis 16 mm			<b>TGL</b> <b>18397</b> Gruppe 135771
Технические пружины <b>Пружины растяжения</b> Проволочный диаметр 0,5 до 16 мм				<b>Mechanical Springs Tension Springs</b> Wire Diameters 0.5 to 16 mm	
Deskriptoren: <u>Zugfeder</u>					
Verbindlich ab 1. 1. 1979					
Dieser Standard gilt für Zugfedern aus rundem patentiert-gezogenem unlegiertem Federstahldraht für technische Federn Klassen A, B und C nach TGL 14193/01, mit Gesamtwindungszahlen von 10 bis 60 und einem Wickelverhältnis $w \leq 14$ .					
Dieser Standard gilt nicht für hauptparameter-bestimmende Zugfedern in Meß-, Steuer-, Schalt- und Regelgeräten, Kupplungen und Bremsen.					
Maße in mm					
Dargestellt ist Form A 1					
Bezeichnung einer Zugfeder aus Federstahldraht Klasse B von Drahtdurchmesser $d = 1,2$ mm; Außendurchmesser $d_a = 8,5$ mm und Gesamtwindungszahl $i_g = 10$ ; Form A 1:					
Zugfeder B 1,2 × 8,5 × 10 A 1 TGL 18397					
Fortsetzung Seite 2 bis 14					
Verantwortlich: VVB Wäitzlager und Normteile, Karl-Marx-Stadt Bestätigt: 30. 6. 1977, Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung, Berlin					

**Bild 6.9:** Standard-Titelblatt zur Auswahl von Zugfedern mit  $d = 0,5$  bis 16 mm

## 6.7 Die Vorsitzenden (Obmänner) des Arbeitsausschusses Federn

### **Karl Kutzbach** (1875 - 1942) [6.12]

Geboren als Sohn eines Kaufmanns in Trier am 19. März 1875, studierte *Karl Kutzbach* 1893 bis 1895 an der TH Aachen und bis 1897 an der TH Berlin-Charlottenburg Maschinenbau. An dieser Hochschule arbeitete er auf dem Gebiet der Theorie und der Konstruktion von Kolbenmaschinen; im Jahre 1900 wechselte er in das Konstruktionsbüro von MAN.

Prof. *Kutzbach* war der erste im Jahre 1913 berufene Professor für das Fachgebiet Maschinenelemente an der TH Dresden. Seine Lehrveranstaltungen waren geprägt von der Klarheit seiner Darstellungen. Seine Prüfungen waren aber auf Grund der hohen Durchfallquote gefürchtet.

Prof. *Karl Kutzbach* war gleichzeitig Leiter des Versuchs- und Materialprüfamt der TH Dresden, einer öffentlichen und von der Industrie gern genutzten Einrichtung.

Zu Prof. *Kutzbachs* Veröffentlichungen zählen u.a. der Abschnitt „Maschinenteile“ in der „Hütte“ (Des Ingenieurs Taschenbuch). Diese Veröffentlichung ist eine erste exakte Gesamtdarstellung der Maschinenelemente sowie Arbeiten über die Grundlagen der Zahnradberechnung, über Keilriemengetriebe und mehrgliedrige Radgetriebe. Ein besonderer Verdienst ist die Entwicklung eines Verfahrens, wonach es auf einfache Art möglich ist, Drehzahl und Geschwindigkeit von komplizierten Umlaufrädergetrieben festzustellen (Kutzbach-Plan).

Nach 1922 hat sich Prof. *Kutzbach* der Normung gewidmet, wobei neben der Federnormung auch die von Verzahnungen hervorzuheben sind.

1928 erhielt Prof. *Kutzbach* die Ehrendoktorwürde der TH Hannover. Prof. *Kutzbach* verstarb am 25. April 1942 in Dresden.

Seine Nachfolge als Obmann des „Arbeitsausschusses Federn“ übernahm Dr. *Stark* von der Technischen Universität Berlin.

### **Helmuth Stark** (1898 - 1995) [6.13]

Herr Helmuth Stark wurde am 23. Oktober 1898 in Gradisca bei Triest geboren. Schon vor dem Krieg war er als Assistent am Lehrstuhl für Mechanik und ab 1938 als Lehrbeauftragter an der Technischen Hochschule Berlin tätig.

Als studierter Schiffsmaschinenbauer und Assistent für Mechanik hatte sich *Helmuth Stark* bald in das Spezialgebiet „Federn“ vertieft, dessen Probleme

matik ihm in seiner Tätigkeit bei den Horchwerken in Zwickau im Fahrversuchswesen begegnet war. Er promovierte über „Die Berechnung der Vorspannung bei Blattfedern“.

Schon 1930 war er Mitarbeiter im Federnausschuss des Vereins Deutscher Ingenieure und deshalb prädestiniert, dem Ausschuss Federn vorzustehen.

Als einer der wenigen persönlich vom Krieg verschonten und politisch unbelasteten Wissenschaftler hat er sich in besonderer Weise um die Entwicklung der Technischen Universität Berlin in der Zeit nach 1945 verdient gemacht. Durch seine Sprachbegabung – englisch, französisch, italienisch, spanisch und kroatisch – war er in den ersten Jahren nach dem Krieg ein einflussreicher Ratgeber des Rektors bei den Verhandlungen mit den Militärregierungen.

1950 wurde *Helmuth Stark* auf Antrag von Rektor und Senat wegen seiner großen Verdienste beim Aufbau der „neuen“ Technischen Universität zum außerplanmäßigen Professor ernannt.

Zu einer seiner bedeutendsten Veröffentlichungen zählt im Taschenbuch des Ingenieurs „Hütte“ der Abschnitt XVIII Federn in der 28. Ausgabe von 1954 [6.17]. Hier geht Professor Dr.-Ing. *Stark* besonders auf die bei der Federauslegung zu beachtenden Spannungen ein.

In Würdigung seiner Verdienste um die Normung verschiedener Federn wird ihm im Januar 1976 die DIN-Ehrennadel vom DIN Deutsches Institut für Normung e.V. verliehen.

1988 wird Prof. Dr.-Ing. *Helmuth Stark* in Anerkennung seiner Verdienste für den Fachbereich Architektur durch den Universitätspräsidenten zum Ehrensator der Technischen Universität Berlin ernannt. Prof. Dr.-Ing. *Helmuth Stark* verstarb 1995 in Berlin.

## **6.8 Ausblick**

### **6.8.1 Nutzen der Normung**

Unter diesem Thema sind immer wieder die unterschiedlichsten Veröffentlichungen erschienen. Jeder der Autoren betrachtet die Normungsarbeit und die Normungsergebnisse aus einem anderen Blickwinkel und somit kann der unbedarfte Fachmann nur schwer seine Rückschlüsse daraus ziehen.

Eines sollte aber für alle klar sein: Die Normungsarbeit tausender ehrenamtlicher Mitarbeiter in den Normenausschüssen hat dazu geführt, dass Deutschland mit zu den führenden Industrienationen zählt.

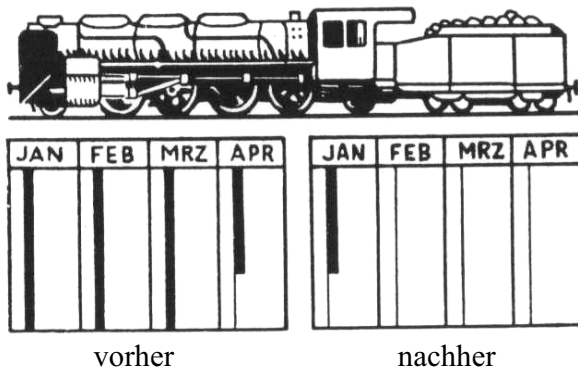
Im Normenheft Nr. 8 [6.15] von 1949 hat sich *R. Kiencke* mit dieser Frage beschäftigt und in der von ihm erstellten Übersicht, die in **Tafel 6.10** wiedergegeben wird, sehr detailliert beantwortet.

**Tafel 6.10.** Nutzen der Normung (zusammengestellt nach [6.15])

<b>Für den Erzeuger</b>		
Entwurfsarbeit	vereinfacht	durch festere, einwandfreie Grundlagen
Arbeitsaufwand	verkleinert	durch wirtschaftlichere Arbeitsweise
Hilfsarbeiten je Stck.	eingeschränkt	durch größere Stückzahl
Werkstoffverbrauch	verringert	durch zweckmäßigere Gestaltung
Betriebsunkosten	verringert	durch vereinfachten Werkzeugpark
Prüfkosten	verringert	durch einheitliche Prüfverfahren
Betriebserfahrungen	bereichert	durch allgemeinen Erfahrungsaustausch
Arbeitsbewertung	gerechter	durch geregeltere Arbeitsbestimmungen
Leistungsfähigkeit	gesteigert	durch wirtschaftlichere Arbeitsmittel
Unfallgefahr	verringert	durch einheitliche Verhütungsmaßnahmen
Beschäftigungsgrad	gleichmäßiger	durch Dämpfung von Saison- und Konjunkturlenflüssen
Kapitalertrag	vervielfacht	durch beschleunigte Auftragsdurchführung
<b>Für den Händler</b>		
Lagerverwaltung	vereinfacht	durch Verringerung der Sorten
Werbekraft	wirksamer	durch gemeinsames Werben
Absatzmöglichkeit	erhöht	durch vielseitige Verwendbarkeit
Stückumsatz	vergrößert	durch vermehrte Ersatzteilnachfrage
Kundenabfertigung	beschleunigt	durch erleichterte Verständigung
Auftrags erledigung	erleichtert	durch einheitlichere Musterausführung
Konjunkturlenfluss	ausgeglichen	durch wirtschaftlichere Vorratshaltung
Wettbewerb	geregelter	durch gleichartige Lieferbedingungen
<b>Für den Verbraucher</b>		
Bezugsmöglichkeiten	vermehrt	durch allgemeinere Nachfrage
Wahl	erleichtert	durch bewährtere Auslese
Preis	erniedrigt	durch kleinere Gesteungskosten
Übervorteilung	eingeschränkt	durch einheitliche Liefervorschriften
Lieferzeit	verkürzt	durch erleichterte Beschaffung
Verwendbarkeit	vermehrt	durch einheitlichere Anschlussgestaltung
Bedienung	vereinfacht	durch gesteigerte Übersichtlichkeit
Betriebsicherheit	vergrößert	durch umfangreichere Erfahrungen
Versicherung	verbilligt	durch niedrigere Einstufung
Genauigkeit	gesteigert	durch gleichmäßigere Ausführung
Instandsetzung	erleichtert	durch ermöglichte Auswechslung
Unterbrechungen	eingeschränkt	durch schnellere Ersatzteilbeschaffung

Auch in Zahlen lässt sich der Nutzen der Normung dokumentieren, wie das in **Bild 6.10** dargestellte Beispiel der angeführten Veröffentlichung [6.15] zeigt.

Die deutsche Reichsbahn konnte durch Vereinheitlichungen die Reparaturzeit bei Lokomotiven mit großen Untersuchungen von 110 auf 16 bis 20 Tage, die Zahl der Reparaturstände von 5000 auf 2150 verringern. Beim Einkauf von genormten Einzelteilen wurden gegenüber ungenormten Einzelteilen gleichfalls bei der Reichsbahn Ersparnisse von 4 % bis 68 % erzielt.



**Bild 6.10:** Reparaturzeit an Lokomotiven durch Normung beeinflusst [6.15]

Eine weitere umfangreiche wissenschaftliche Studie zum „Gesamtwirtschaftlichen Nutzen der Normung“ wurde im Jahre 2000 vom DIN veröffentlicht [6.16]. In den drei Einzelwerken

- Unternehmerischer Nutzen 1, Wirkungen von Normen: Ergebnisse der Unternehmensbefragung und der Experteninterviews
- Unternehmerischer Nutzen 2, Statistisches Material und Auswertung
- Volkswirtschaftlicher Nutzen, Zusammenhang zwischen Normung und technischem Wandel, ihr Einfluss auf die Gesamtwirtschaft und den Außenhandel der Bundesrepublik Deutschland

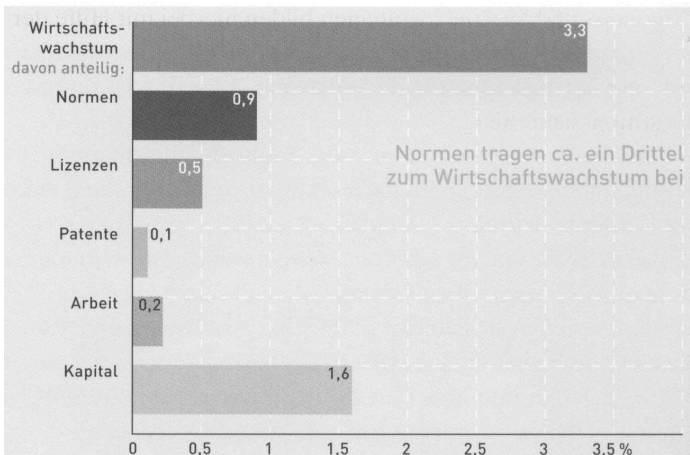
haben die Wissenschaftler der Lehrstühle für Marktorientierte Unternehmensführung und für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung der TU Dresden sowie dem Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (FhG-ISI), Karlsruhe, versucht, zum „Gesamtwirtschaftlichen

Nutzen der Normung“ eine Antwort zu geben. Diese Gemeinschaftsstudie wurde in den Ländern Deutschland, Österreich und der Schweiz parallel durchgeführt und vom DIN federführend begleitet.

Das Fazit dieser Erhebung ist:

Zum durchschnittlichen jährlichen Wirtschaftswachstum der Bundesrepublik Deutschland in Höhe von 3,3 % (für den Zeitraum 1960 bis 1990, bezogen auf die Bruttowertschöpfung im Unternehmenssektor) trug die Normung zu einem Drittel bei. Für den Zeitraum 1997 bis 1998 ergab sich ein Zuwachs der Bruttowertschöpfung von insgesamt 45 Mrd. DM, wovon 12 Mrd. DM der Normung zuzuordnen sind.

**Bild 6.11** verdeutlicht die Aussage.

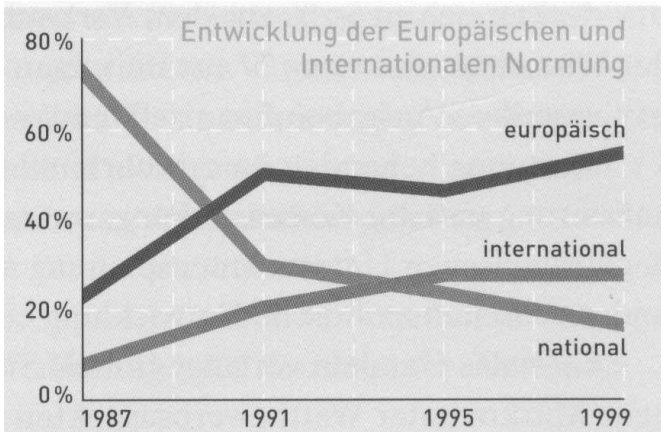


**Bild 6.11:** Beitrag der Normen zum Wirtschaftswachstum

### 6.8.2 Normung im Wandel

Durch den sich vergrößernden Welthandel ist ein Umdenken in der Normungsarbeit nötig. Weg von den nationalen Normen des DIN, hin zu der europäischen Normungsarbeit im CEN und zur internationalen Normungsarbeit im ISO. Diese Entwicklung lässt sich sehr deutlich aus der DIN-Statistik [6.14] zur Normentwicklung ablesen, wie **Bild 6.12** zeigt.





**Bild 6.12:** Entwicklung der Normung

Der Anteil der europäischen und internationalen Normungsprojekte beträgt 54 % bzw. 28 %. Der Anteil der rein nationalen Normen ging von 72 % auf 18 % zurück.

Trotzdem ist die Pflege nationaler Normen von immenser Bedeutung, weil der Inhalt einer DIN-Norm den technischen deutschen Stand widerspiegelt. Alle interessierten Kreise sind in der Lage, diese Standards aufgrund des Übereinkommens zum Normeninhalte einzuhalten und auch in der Objektqualität dem Markt zur Verfügung zu stellen.

In der internationalen Normungsarbeit werden die Inhalte von DIN-Normen als Basis für neu zu erarbeitende Standards akzeptiert. Es muss aber gewährleistet sein, dass in den internationalen Normsitzungen die deutsche Seite durch die Delegierten vertreten werden, die an der Erarbeitung der deutschen DIN-Ausgabe mitgewirkt haben. Denn nur diese Fachleute sind in der Lage, den Norminhalt richtig zu interpretieren und die Fachleute aus den verschiedenen Ländern von der Richtigkeit der festgeschriebenen Werte zu überzeugen. Die Überzeugungsarbeit ist heute nicht zu unterschätzen und verlangt von den nationalen Delegierten nicht nur ein großes Maß an Diplomatie, sondern auch ein großes Engagement, nationale Interessen den eigenen voranzustellen.

Internationale Normsitzungen werden meist in englischer Sprache geführt, deshalb wird von den Teilnehmern nicht nur die fachliche Kompetenz,

sondern auch noch fremdsprachliche Ausdrucksweise verlangt. Auf unsere Unerstützung sind die Verantwortlichen auf den unterschiedlichsten Normensitzungen angewiesen, weil sie nur das vertreten können, was von der Mehrheit der Marktteilnehmer gefordert wird. Eine gesellschaftliche Akzeptanz muss den Delegierten für ihre geleistete Arbeit entgegengebracht werden, damit der Binnenmarkt gestärkt wird.

## **7 Die Entwicklung der deutschen Federnindustrie**

### **7.1 Überblick**

Wie aus Berichten zum Entstehen und zur historischen Entwicklung von zahlreichen Feder herstellenden Betrieben in Deutschland und der Analyse zahlreicher Publikationen des 19. und 20. Jahrhunderts hervorgeht, hat sich in Deutschland die industrielle Fertigung von Federn im Laufe des 19. Jahrhunderts entwickelt. Davor wurden Federn handwerklich, meist in kleinen Stückzahlen wie es der Bedarf erforderte, gefertigt. Schlosser und Gerätebauer stellten ihre für Schließeinrichtungen und Bauteilrückführeinrichtungen benötigten Federn ebenso selbst her wie auch die Uhrmacher. Wagen- und Kutschenfedern (s. Abschn. 4.1.4) wurden meist von Schmieden hergestellt. Hinweise auf eine eigene Federmacherzunft gibt es aus dieser Zeit der handwerklichen Federnfertigung nicht.

Anhand einiger Beispiele soll diese Entwicklung der Federnindustrie aus den handwerklichen Fertigungsstätten in Deutschland aufgezeigt werden.

### **7.2 Die handwerklichen Quellen der Federherstellung**

#### **7.2.1 Das Schmiedehandwerk**

Schmieden ist eines der ältesten Verfahren der Metallbearbeitung (s. Abschn. 2.2.2). Der Beruf des Schmieds hat eine mehrere tausend Jahre alte Geschichte. Dazu gibt es bereits aus dem Altertum Hinweise [7.13][7.17]. Von Schmieden wurden sowohl Verfahren der Metallschmelzung als auch zur Warm- und Kaltverarbeitung der Metalle angewendet. Das Kaltschmieden von Schwertern [7.13] kann wohl in seiner damaligen Zeit als Vorläufer für eine Federnfertigung angesehen werden.

Mit der Entwicklung der Landwirtschaft wurde der Schmied im ländlichen Raum zu einem Universalhandwerker. Im Verlaufe der Entwicklung dieses Handwerks und mit der Zunahme der Anforderungen wurden jedoch bestimmte Spezialisierungen erforderlich. Solche Spezialisierungen waren Huf- und Wagenschmied, Kunstschmied, Werkzeugschmied, Goldschmied und auch Federschmied, wobei sich die Spezialisierung „Federschmied“ mit dem zunehmenden Gebrauch an gefederten Wagen und vor allem an Kutschen [7.32] im Mittelalter herausgebildet hat (s.a. Abschn. 4.1.4).

Mit der Entwicklung des Eisenbahnwesens im 19. Jahrhundert und des Automobilbaues Ende des 19. Jahrhunderts stieg der Bedarf an Fahrzeugtragfedern in der Form von Einzelblattfedern und geschichteten Blattfedern so stark an, dass eine Einzelfertigung auf handwerklicher Basis diesen Bedarf nicht mehr decken konnte. Eine industrielle Fertigung dieser Federn bildete sich im Verlauf des 19. Jahrhunderts vor allem in den Zentren der Metallerschmelzung und –bearbeitung im Ruhrgebiet und auch an einigen anderen Standorten in Deutschland aus. Als Beispiele seien hierzu die Betriebe

- Brünninghaus in Werdohl (heute: ThyssenKrupp Bilstein Suspension GmbH in Ennepetal),
- Dittmann & Neuhaus in Witten-Herbede (heute: Luhn & Pulvermacher – Dittmann & Neuhaus GmbH in Hagen),
- J. P. Grueber in Hagen (heute: Federnwerke J. P. Grueber GmbH & Co. KG in Hagen),
- Hoesch-Federn in Hagen-Hohenlimburg (heute: ThyssenKrupp Bilstein Suspension GmbH in Ennepetal) und
- Schomäcker Federnwerke in Melle (heute: Schomäcker Federnwerk GmbH in Melle)

genannt [7.12][7.16][7.24].

### **7.2.2 Das Schlosserhandwerk und andere metallverarbeitende Handwerke**

Das Schlosserhandwerk ging als eines von vielen metallverarbeitenden Gewerken aus dem Schmiedehandwerk hervor. Im Mittelalter erfolgte eine Spezialisierung der Metallverarbeitung zunächst auf die Herstellung von Schlössern an Türen und Toren und auf die Schließeinrichtungen für Truhen, Kästen, Schatullen und anderer Behältnisse (daher auch der Name „Schlosser“). Bei dieser Tätigkeit war in zunehmendem Maße auch die Herstellung der verschiedensten Federn erforderlich. Vornehmlich waren es Blattfedern sowie Spiralfedern und Formfedern aus Federbandmaterial. Später erfolgte auch die Verwendung von Drehfedern aus Draht, deren Herstellung ebenfalls Schlosser vornahmen.

Von Schlossern wurden aber auch Beschläge, Gitter, Geländer und andere Gegenstände aus Metall hergestellt. Durch eine behördliche Festlegung wurde vielerorts geregelt, welche Arbeiten durch Schmiede und welche

durch Schlosser ausgeführt werden durften. Eine Schlosserspezialisierung als „Federmacher“ ist in der älteren Literatur nicht dokumentiert.

Im 19. und 20. Jahrhundert spezialisierte sich aus dem Schlosserhandwerk und aus dem Uhrmacherhandwerk auch der Beruf eines Mechanikers, der die Produktion und Wartung von mechanischen und feinmechanischen Geräten (Schreibmaschinen, Rechenmaschinen, Reglereinrichtungen, Spielwaren und Schmuck sowie auch Musikinstrumente) vornahm.

In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts erfuhr das Schlosserhandwerk einen grundlegenden Wandel, als Schlösser und andere Schlosserwaren zunehmend industriell gefertigt wurden.

Während von Schmieden Federn vorwiegend warm verarbeitet wurden, so ist bei Schlossern und anderen metallverarbeitenden Berufen meist die Kaltformgebung vorherrschend.

Aus derartigen handwerklichen Betrieben sind beispielsweise die heutigen Federfertigungsstätten bzw. Maschinenhersteller

- Ahle Federn, Karlsthal,
- Federnwerke Paul Plate, Hagen-Vorhalle,
- Christian Bauer GmbH & Co. KG, Welzheim,
- Dr. Werner Röhrs KG, Sonthofen,
- Scherdel GmbH, Marktredwitz,
- Johann Vitz GmbH & Co. KG, Velbert und auch die
- WAFIOS AG, Reutlingen

hervorgegangen, die später die Produktion der verschiedensten Federn vornahmen und im Falle der Fa. WAFIOS zu einem führenden Betrieb der Herstellung von Federwindeautomaten wurden.

### 7.2.3 Das Uhrmacherhandwerk

Uhren gab es in Europa ab dem 13./14. Jahrhundert [7.23]. Die früheste schriftliche Erwähnung eines Uhrmachers stammt aus dem 14. Jahrhundert. Auf Rechnungen eines Zisterzienserklosters wird ein „horologiarius“ genannt [7.10][7.29]. Bis zur Mitte des 14. Jahrhunderts ist keine eigenständige Bezeichnung für den Beruf des Uhrmachers bekannt. Überliefert ist lediglich, dass der Abt des Benediktinerklosters St. Alban den Ruhm eines „Uhrmachers“ genoss und die Klosterinstandsetzung zu Gunsten des Uhrenbaus vernachlässigte [7.10]. Konstrukteure für Baugeräte, Mühlen, Wasserbauten, Musikinstrumente sowie Armbrustmacher, Schlosser und Goldschmiede waren die ersten, die auch Uhren herstellten [7.29].

Nur wenige dieser Konstrukteure verstanden sich als „Uhrmacher“. Erst im 15. Jahrhundert erscheint in Mitgliedslisten der städtischen Zünfte auch der Uhrmacher als Berufsgruppe innerhalb des Schlosser- und Schmiedehandwerks. Im 16. Jahrhundert sind dann die Uhrmacher in eigenen Zünften organisiert.

Die handwerkliche Fertigung von Uhren war bald der großen Nachfrage an Uhren nicht mehr gewachsen. So entwickelten sich vor allem im 18. und 19. Jahrhundert zahlreiche Uhrenfabriken. In Deutschland gehörte die Region des Schwarzwaldes bereits ab 1700 zu den führenden Uhrenherstellern der Welt.

Um 1680 brachte ein Glasträger eine aus Böhmen stammende hölzerne Standuhr in den Schwarzwald. Diese Uhr bildete den Ausgangspunkt für das Entstehen der Uhrenindustrie im Schwarzwald. Ab 1740 machte dann die Uhr mit Unruh als Regulator der Pendeluhr Platz [7.7].

Ursprünglich machte jeder Uhrmacher das Ganze der Uhr selbst. Im Laufe des 18. Jahrhunderts entwickelte sich zunehmend eine Spezialisierung auf die Fertigung bestimmter Uhrenteile, über die es auch einen schriftlichen Nachweis in einem Buch von *Poppe* gibt [7.29]. Titelseite und Zitatort zeigt **Bild 7.1**. Es gab z.B. Räder- und Getriebemacher, Ketten- und **Federmacher**, Zifferblatt- und Zeigermacher sowie Vergolder, Emaillierer u.a.. Das ist der erste Hinweis auf einen Federmacher, der im Schmiede- und Schlosserhandwerk zu dieser Zeit fehlt.

Diese Spezialisierung innerhalb der Uhrenfertigung ist auch der Ausgangspunkt für das Entstehen eigenständiger Federfertigungsstätten als Zulieferbetriebe für die Uhrenindustrie. Es wurden vor allem Aufzugfedern und Unruhspiralen gefertigt.

*Hugo Kern*, Urgroßvater des heutigen Vorsitzenden der Geschäftsführung der Kern-Liebers Gruppe Dr. *Hans Jochem Steim*, hatte 1888 in Schramberg im Schwarzwald mit der Uhrenfederproduktion begonnen [7.6]. Dieser Betrieb soll hier als Beispiel für die Entwicklung der deutschen Uhrenfederproduktion (Roll- und Antriebsfedern, Unruhfedern ...) angeführt werden. Als weiterer Betrieb mit ähnlichem Produktionsprofil ist auch der Mitte des 20. Jahrhunderts gegründete Betrieb Kurt Meder GmbH in Villingen-Schwenningen zu nennen.

Neben der Uhrenfederherstellung haben sich im 19. und 20. Jahrhundert auch Fertigungsstätten für Federn entwickelt, die vor allem Federn für den feinmechanischen Gerätebau, die Elektrotechnik und die Spielzeugindustrie herstellten. Beispiele dafür sind die Betriebe Federnfabrik Dietz GmbH in Neustadt bei Coburg und die Gebrüder Schmidt GmbH in Wuppertal.

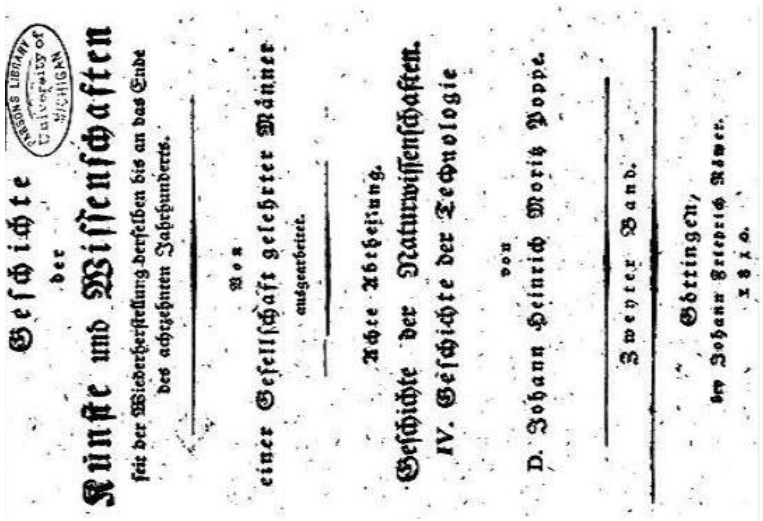
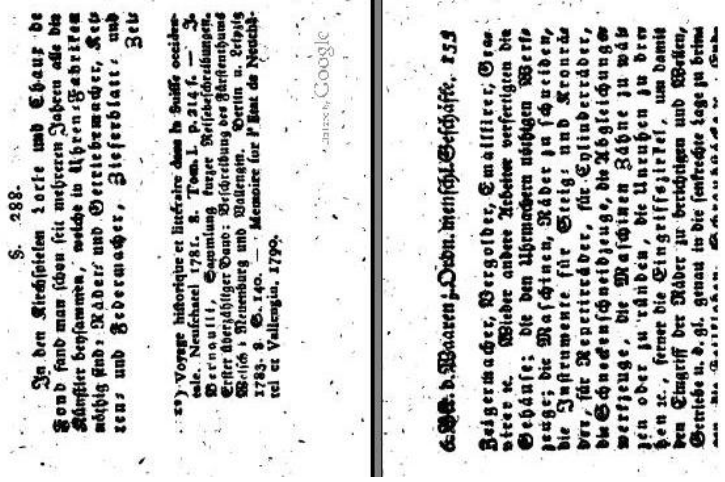


Bild 7.1: Quelle (Titel und Zitatseite) der ersten Erwähnung eines Federma- chers [7.29]



## 7.3 Ausgewählte Firmenchroniken als Beispiele für die Entwicklung der deutschen Federnindustrie

Viele heutige Betriebe der Federnindustrie entstanden aus schmiedehandwerklichen Unternehmungen. Aber auch viele andere metallverarbeitende Handwerke bildeten die Grundlage für die Federherstellung.

Charakteristisch für die überwiegende Mehrzahl dieser Betriebe ist der Familienbesitz und die Leitung des Betriebes durch Familienmitglieder über viele Generationen hinweg bis heute.

In den letzten Jahren wurde von vielen Federherstellern der nationale und internationale Verbund von Firmen mit ähnlichem oder ergänzendem Produktionsprofil gesucht und realisiert, wie einige der angeführten Beispiele zeigen.

### 7.3.1 Metallerschmelzung und Schmiede

#### 7.3.1.1 Brüninghaus in Werdohl

Die Geschichte der Stahlwerke Brüninghaus beginnt **1562** mit einem *Peter to Brüninckhusen*, der als Reidemeister tätig war [7.11][7.30]. Reidemeister nannte man die Leiter des Berg- und Hüttengewerbes einschließlich der Osemund-Schmieden (Schmiededrahtherstellung) sowie des weiterverarbeitenden Eisengewerbes.

Der Nachfahre *Johann Caspar Brüninghaus* (1791 - 1863) sowie seine Söhne siedeln 1862 mit dem Bau einer neuen Fabrik von dem abseits gelegenen Brüninghausen nach Werdohl, das durch die 1861 eröffnete Ruhr-Sieg-Eisenbahn Vorteile bot.

Nach dem 1. Weltkrieg ist man wegen Engpässen in der Belieferung mit Roheisen gezwungen, das Siemens-Martin-Werk und die Stahlformerei stillzulegen und statt dessen eine **Federnfabrik** zu errichten, die Waggon- und Lokomotivfedern, Automobil- und Wagenfedern sowie Maschinen- und Spiralfedern erzeugen soll. Erzeugnisschwerpunkt sind zunächst Eisenbahnfedern. Ergänzt wird diese Investition durch die Herstellung von Beschlagteilen für Waggonen und Lokomotiven. Die Kapazität der Federnfabrik wird mit 8.000 t/Jahr angegeben. Den Federstahl bezieht man vom Bochumer Verein. 1923 weitet man wegen des guten Absatzes die Federkapazitäten aus. In den folgenden Jahren nimmt auch die Fertigung von Automobilfedern zu. Die Produktion wird 1930 durch die Aufstellung einer modernen amerikanischen Härtemaschine mit entsprechenden Härte- und Anlassöfen



modernisiert. Mit dem weiteren Ausbau in den Jahren 1934 bis 1939 können auch schwere Autoblattfedern gefertigt werden. Die Ausweitung auf Drehstabfedern und schwere Schraubenfedern erfolgt um 1941 [7.31].

Im Zuge der Entflechtung und Neuordnung der Eisen- und Stahlindustrie nach dem 2. Weltkrieg wird 1951 die Stahlwerke Südwestfalen AG gegründet [7.33], der die Stahlwerke Brüninghaus GmbH als Tochtergesellschaft angegliedert wird.

Nach dem 2. Weltkrieg wird die Federnproduktion relativ schnell wieder aufgenommen und die zunehmende Motorisierung führt zu großen Produktionssteigerungen. An warmgeformten Federn werden zu dieser Zeit Blatt- und Schraubenfedern, Drehstabfedern und Stabilisatoren für Straßen- und Schienenfahrzeuge, Bergbau, allgemeinen Maschinen- und Landmaschinenbau gefertigt.

Der aufstrebende Betrieb konnte im Jahre 1980 die Federnfabrik Paul Plate erwerben und 1987 in Spanien die Firma Mure in Bilbao zukaufen. Mit dem Übergang der Stahlwerke Südwestfalen in den Krupp-Konzern wurde auch Brüninghaus 1985 eingegliedert. Durch die weitere Konzentration der deutschen Stahlindustrie (Hoesch, Krupp, Thyssen) in den 1990er Jahren änderte sich der Firmennamen letztlich in ThyssenKrupp Bilstein Suspension GmbH.

### 7.3.1.2 J. P. Grueber in Hagen

Der früh verwaiste Lehrersohn *Johann Peter Grueber* (1795 - 1855) aus Rönsahl erlernte das Handwerk des Schüppenschmieds [7.14] und arbeitete anschließend als Geselle, bis er sich im Jahre **1828** auf der Boelerheide (heute Hagen-Boelerheide) selbständig machte. Zunächst bezog er Halbzeug von dem Fabrikanten und Kommissionär *Tenhaeff*, welches er mittels Schmiedeofen und dem gepachtete Schmiedefeuer zu Fertigwaren wie Spaten, Schüppen, Pfannen, Gabeln und Hacken verarbeitete und dann seinem Vormateriallieferanten zum Vertrieb zurückgab.

Durch Fleiß und Umsichtigkeit war es ihm bereits Ende 1832 möglich, einen Schmiedekotten samt Grundstück im heutigen Hagen-Wehrighausen zu erwerben. Das Unternehmen blieb für die nächsten 145 Jahre an diesem Standort.

Die Qualität seiner Produkte erlaubte *J. P. Grueber* einen eigenen Absatzmarkt zu erschließen [7.28], das Geschäft personell wie umsatzmäßig auszuweiten und im Jahre 1850 eine neue Schmiede zu bauen.

Nach dem Tod des Firmengründers übernahm sein 22-jähriger Sohn *Wilhelm Grueber* (1834 – 1919) vollverantwortlich den Betrieb und beschäftigte in den 1870er und 1880er Jahren etwa 50 Mitarbeiter.

Gegen Ende des 19. Jh. führten billige Massenware, Standortnachteile durch fehlende Wasserkraft und ein zu konservatives Qualitätsdenken in der Fertigung zur wirtschaftlichen Krise, so dass die Produktion 1897 eingestellt werden musste und nur das Handelsgeschäft weiter betrieben wurde. Beigetragen zu dieser Entscheidung hatte auch der Entschluss der beiden Söhne, sich außerhalb des Unternehmens zu engagieren.

Jedoch übernahm 1906 der Sohn *Wilhelm Grueber jun.* (1865 - 1922), der bis dahin als Technischer Leiter von Maschinenfabriken erfolgreich tätig gewesen war, die brachliegenden Anlagen, um zunächst auf dem Fallhammer leichte Gesenkschmiedeteile zu fertigen.

Im Jahre 1907 wurde mit der Herstellung von **kaltgeformten Schraubenedern** begonnen und 1908 schloss sich die Aufnahme der Produktion von Blattfedern an. Die Zahl der Mitarbeiter stieg bis zu Beginn des 1. Weltkriegs auf etwa 70 Beschäftigte an. Nach dem Krieg wurde der Betrieb ausgebaut und 1920/21 ein Fabrikneubau erstellt.

Der Jungeselle *Wilhelm Grueber jun.* heiratete 1921 die Kriegerwitwe *Else Waterstradt*, die ihren Sohn *Werner Waterstradt* mit in die Ehe brachte. Jedoch starb der Firmeninhaber im Jahre 1922 nach einer schweren Operation. Zu seinen Nachfolgern hatte er seinen Neffen und Pflegesohn *Heinrich Nettmann* und seinen Stiefsohn *Werner Waterstradt* bestimmt. Da diese noch in der Ausbildung standen, übernahm die Leitung der Geschäfte *Emil Otto Rath*, der engste Mitarbeiter des Verstorbenen.

Als die Nachfolger in den ausgehenden 1920er Jahren die Geschäftstätigkeit übernahmen, hatten sie bald die Schwierigkeiten der Weltwirtschaftskrise zu bewältigen. Dem Abbau der Belegschaft um mehr als die Hälfte folgte bis zum Beginn des 2. Weltkriegs ein Anstieg auf etwa 150 Mitarbeiter, da Federn für Schienen- und Straßenfahrzeuge gebraucht wurden.

Da die Produktionsanlagen von den Luftangriffen im 2. Weltkrieg verschont blieben und lediglich der Wohn- und Bürotrakt getroffen wurden, konnte die Fertigung nach Erlaubnis der Besatzungsmacht 1945 wieder aufgenommen werden. Jedoch litt das Unternehmen ab 1947 durch den Demontagebefehl, der bis April 1949 zu 75 % umgesetzt wurde. Nach Aufgabe der Demontagepolitik wurden die Fertigungseinrichtungen fast vollständig rücküberführt, so dass im Spätsommer 1949 wieder voll gefertigt werden konnte. Die Zahl der Mitarbeiter erreichte 1953 erneut 150 Beschäftigte.

In den Jahren 1962/63 übernahm mit *Helmut Waterstradt* und *Hans Peter Nettmann* die 5. Generation das Unternehmen.

Der wirtschaftliche Aufschwung nach dem Kriege hatte zu Betriebsverweiterungen in den Jahren 1957 und 1961 geführt, wodurch man an die Grenzen der Nutzbarkeit des Grundstücks stieß. Auch die Stadt Hagen hatte im Laufe der Jahrzehnte das Betriebsgelände umschlossen.

Verhandlungen zur Stadtsanierung führten 1977 zur Verlagerung des Unternehmens in das neue Gewerbegebiet „Lenneschiene“ zwischen Berchum und Reh. Dort ist der Betrieb bereits mehrmals erweitert und den Marktanforderungen angepasst worden.

So wurde die Produktion von Blattfedern für LKW-Anhänger 1982 aufgegeben und 1983 mit der Herstellung von Tuning-Schraubenfedern für den PKW-Bereich begonnen. Bedeutsam für das Wohlergehen der Firma waren auch die anschließenden Investitionen in die umweltverträglichen Anlagen zur Oberflächenveredelung durch Pulverbeschichtung bzw. wasserbasierte Nasslackierungen.

Seit 2002 vollzieht sich mit *Matthias Nettmann* als neuem Geschäftsführer und *Titus Waterstradt*, der ebenfalls seit einigen Jahren im Unternehmen tätig ist, die Übergabe an die 6. Generation.

### 7.3.1.3 Hoesch-Federn in Hagen

Der 1856 gegründete Limburger Fabrik- und Hüttenverein in Limburg an der Lenne erweitert 1872 seine Aktivitäten um eine Fabrik zur Anfertigung von Eisenbahnwaggonfedern [7.16], die immerhin 929.234 Pfund Waggonfedern im ersten Geschäftsjahr herstellt, ehe der Betrieb im Geschäftsjahr 1873/74 wegen der schlechten konjunkturellen Allgemeinsituation zum Erliegen kommt.

Der erneute Einstieg in eine Federnproduktion gelingt erst im Jahre 1920 unter dem Eisen- und Stahlwerk Hoesch – an das der Limburger Fabrik- und Hüttenverein im Jahre 1907 Anschluss gefunden hatte – durch eine 60%-Beteiligung am „Drahtwerk Boecker & Röhr“. Dieses 1882 gegründete Drahtwerk hatte vom Unternehmer *Fritz Giese* die 1912 zusätzlich zur existierenden Kaltbandproduktion eingerichtete Herstellung von Drahtfedern bis 10 mm Drahtdurchmesser auf Windeautomaten übernommen. Im Sommer 1919 weitet Boecker & Röhr auf Reichsbahnfedern mit acht Fachkräften von Dittmann & Neuhaus aus. Dagegen wird die Fertigung der Drahtfedern im Jahre 1921 aufgegeben

Ab 1925 werden auch Blattfedern für Automobile in Hohenlimburg hergestellt. 1927 erfolgt die Aufstellung der ersten Federbiege- und Härtemaschine durch die Maschinenfabrik Deutschland [7.8]. 1940 wird eine Stabfedernabteilung eingerichtet, die insbesondere Drehstäbe für die Kettenpanzer

und den Kübelwagen produziert. Auch die Schraubenfederfertigung wird auf kriegswichtige Produkte, z.B. Geschützfedern, ausgerichtet. Der Versand an Federn erreicht im Geschäftsjahr 1943/44 sein Maximum mit über 15.000 Tonnen.

Nach dem 2. Weltkrieg beginnt der mühsame Wiederanlauf der Produktion [7.9], der durch Demontage, verzögerte Arbeitsgenehmigungen und Schwierigkeiten in der Energieversorgung gekennzeichnet ist. Mit der Währungsreform vom 20. Juni 1948 wird der entscheidende Schritt zum wirtschaftlichen Aufschwung getan, so dass auch die Erzeugung des Federnwerkes von 2.952 Tonnen Federn im Geschäftsjahr 1947/48 auf 18.571 Tonnen im Geschäftsjahr 1951/52 ansteigt und die bisherige Spitzenleistung aus dem Jahr 1943/44 übertrifft.

Die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts kommt es neben der technischen Modernisierung [7.27] der Fertigungen zu leistungsfähigen kontinuierlichen Fertigungsstraßen insbesondere auch zur Formierung der Hoesch-Federngruppe. Im Inland finden 1963 Verhandlungen statt, die zu einer Mehrheitsbeteiligung an der Dittmann & Neuhaus AG, gegründet 1888 in Witten-Herbede, führen. 1974 gelingt der Erwerb eines 50%-Anteils an Luhn & Pulvermacher in Hagen-Haspe, der 1990 auf 100% aufgestockt wird. Die beengten Gebäudeflächen im Kernwerk machen es 1971 notwendig, die leichte Stabfedern- und Stabilisatorenfertigung nach Olpe-Lütringhausen zu verlagern.

Im Ausland folgt Hoesch den Auslandsaktivitäten deutscher Automobil-Unternehmen. Zuerst wird 1960 das argentinische Federnwerk Hoesch Argentina gegründet. Es folgen 1967 die Beteiligungen an Federnwerken in Brasilien und Mexiko. 1973 kommt es zur Gründung des Federnwerkes Indusa in Madrid. Im Jahr 1989 entsteht ein völlig neues Federnwerk in Hamilton/Ohio USA. Mit der Übernahme des restlichen Anteils von Luhn & Pulvermacher im Jahr 1990 wird auch das 1967 gegründete Federnwerk Impormol in Azambuja/Portugal in die Federngruppe integriert. Im selben Jahr erwirbt man die bereits 1850 gegründete Woodhead Ltd. in Großbritannien mit Werken in Leeds, Aycliffe und Sheffield.

Durch den Zusammenschluss der Konzerne Krupp und Hoesch wird die Hoesch-Federngruppe aus der Hoesch Hohenlimburg ausgegliedert und als Hoesch Federn GmbH zum 01.01.1993 in die Konzernsparte Krupp Hoesch Automotive eingegliedert. Wegen der Kartellamtsproblematik übernimmt Hoesch Federn zunächst nur das 1958 gegründete spanische Federnwerk Mure in Bilbao, das 1987 von Krupp Brüninghaus erworben wurde. 1995 wird das Joint Venture Liaoyang Krupp Sogefi Automotive Springs in China gegründet. Erst nach Abschluss der Verhandlungen mit dem Kartellamt, der 1996 zum Verkauf der Werke Luhn & Pulvermacher sowie Dittmann &

Neuhaus an den italienischen Wettbewerber Rejna führt, kommt es zur Bildung der Krupp Hoesch Federn GmbH unter Einschluss von Krupp Brüninghaus mit Werken in Werdohl und Hagen (ehemals Fa. Plate).

Die veränderte Federngruppe erwirbt das rumänische Federnwerk in Sibui, das seit 1997 als Krupp Compa Arcuri firmiert.

Die Fusion der Stahlkonzerne Thyssen und Krupp im Frühjahr 1999 führt schließlich zur Bündelung der Feder- und Stoßdämpferaktivitäten in der ThyssenKrupp Bilstein Suspension GmbH in Ennepetal.

### 7.3.2 Drahtzieher und Drahtverarbeitung

#### 7.3.2.1 Ahle Federn in Karlsthal

Im Jahre 1904 gründeten die drei Brüder *Dietrich, Wilhelm und Adolf Ahle* als erfahrene Drahtzieher und Federmacher ein Federnwerk in Hohenlimburg (heute Hagen-Hohenlimburg) [7.15]. Das Firmenlogo soll die Einigkeit der drei Brüder und das stetige Bewegen symbolisieren. 1910 werden dem Betrieb eine Drahtzieherei und zur Herstellung von Flachmaterial ein Kaltwalzwerk angegliedert.

Die Federproduktion wird 1918 zunächst durch ein Zweigwerk in Karlsthal bei Lindlar im Oberbergischen erweitert. Jedoch entschließt man sich 1920, das gesamte Unternehmen dorthin zu verlagern. Hauptprodukte sind zu dieser Zeit Stahlbänder und gezogene, legierte Stahldrähte. Ab 1939 intensiviert man die Federproduktion. Der erste Federwindeautomat wird aufgestellt.

Nachdem die Zwangstilllegung nach dem 2. Weltkrieg überwunden war, konnten ab 1947 wieder Federn, Kaltband und Draht gefertigt werden. Im Jahre 1950 beginnt die Firma mit der Herstellung von Schraubenfedern für die Achsen von Kraftfahrzeugen. Die Umsetzung technischer Ideen führt seit 1960 zur Entwicklung und nachfolgend zum umfangreichen Serieneinsatz der Superprogressivfeder. Etwa ab 1970 schließt sich die Entwicklung der Minibloefeder an, die ab 1979 ihren Großserieneinsatz zunächst als Fahrzeugtragfeder und anschließend auch als Bremsspeicherfeder erreicht. Die Umsetzung technischer Ideen führt 1960 zur Entwicklung der Superprogressivfeder. Die Federstäbe werden auf eigenentwickelten Zieh Drehmaschinen hergestellt.

Im Jahre 2002 erzielte der Betrieb mit 140 Beschäftigten einen Umsatz von 17 Mio. Euro. Geleitet wird das Familienunternehmen in der dritten Generation von *Joachim Ahle* [7.5][7.15].

### 7.3.2.2 Scherdel GmbH in Marktredwitz [7.3][7.19]

*Sigmund Scherdel* und *Friedrich Weiß* eröffnen 1889 in Marktredwitz die Drahtzieherei Scherdel & Weiß. Der Gründungseintrag der Firma erfolgte im Januar 1890. Ein frühes Engagement bei der Entwicklung von Ventildedern folgte. 1915 wird der erste Federwindeautomat aus Reutlingen aufgestellt. Die automatische Schraubenfederherstellung nimmt ihren Anfang. 1936 wird das Kugelstrahlen zur Oberflächenverfestigung bei der Schraubenfederproduktion eingeführt und 1943 erfolgt die Inbetriebnahme des ersten Fließbandes zur Druckfederherstellung. Ein weiterer technischer Fortschritt zur Sicherung der Warmfestigkeit von Ventildedern wird 1956 durch die Einführung des SCHERDEL-Ultra-Verfahrens erreicht. 1961 beginnt man mit dem Einsatz vollautomatischer Fertigungsstraßen für die Ventildederproduktion.

1984 erfolgt die Gründung der Datec Scherdel-Verwaltungs-GmbH. Ihre Aufgaben sind Datenverarbeitung, Software-Entwicklung, Federberechnungsservice sowie Teilbereiche der Qualitätssicherung. Daraus entwickelt sich in den 90er Jahren die Innotec Forschungs- und Entwicklungs-GmbH. Untersuchungen zu Eigenspannungen an Schraubenfedern führten 1989 zur Einführung eines neuen Verfahrens, des SOF-Verfahrens.

1990 besteht SCHERDEL aus 19 Mitgliedsfirmen und Beteiligungen an verschiedenen Unternehmungen in Europa. 1991 werden die Fertigungswerke für Federn am Standort Marienberg (hervorgegangen aus dem VEB Draht- und Federnwerke Karl-Marx-Stadt, s. Abschnitt 6.2.3) übernommen, und 1992 wird die Firma C.E.P. Scherdel Pružiny in der Slowakei gegründet. 1996 nimmt die Firma Technicke pružiny Scherdel in Tschechien ihre Produktion auf. 1997 wird die SCHERDEL SALES & TECHNOLOGY in den USA gegründet. 2000 nimmt SCHERDEL do Brasil seine Produktion auf.

2003 folgt ein Joint-Venture mit der japanischen Togo-Seisakusyo-Gruppe, die Gründung der SCHERDEL-TOGO Corporation und der TOGO-SCHERDEL GmbH sowie die Fertigung von Federelementen für Kolbenringe in Japan. In Marienberg beginnt die Federbandschellenproduktion. Die Shanghai SCHERDEL Spring Co. Ltd. in China und SCHERDEL de Mexico in Mexiko werden gegründet.

Ab 2004 fertigt SCHERDEL weltweit Federn an über 20 in- und 10 ausländischen Standorten.

### 7.3.2.3 WAFIOS AG in Reutlingen [7.21][7.25]

Am 1. April errichtet *Ernst Wagner* in Pfullingen eine mechanische Werkstätte und stellt Handflechtmaschinen für Drahtzäune her. 1905/06 werden die automatischen Drahtflechtmaschinen in London und Brüssel ausgestellt und erhalten goldene Medaillen. 1909 erfolgt der Umzug nach Reutlingen. *Hans Ficker* wird Teilhaber. Unternehmensbezeichnung: Wagner und Ficker Maschinenfabrik. 1914 schließt sich die Firma Wagner und Ficker mit dem Konkurrenten *Otto Schmid* aus Stuttgart zusammen. Beide Firmen fusionieren unter der Bezeichnung **WAFIOS** (entstanden aus **W**agner, **F**icker und **O.** Schmid).

Eine Programmerweiterung durch Federwindmaschinen, Nagelmaschinen und Drehautomaten für Schrauben erfolgt 1918. Die erste kupplungsgesteuerte Federwindmaschine für Drahtdurchmesser bis 6 mm wird 1923 ausgeliefert.

Dr. *Otto Schmid* jun. tritt 1927 als Vorstand in die WAFIOS AG ein. Die Südwerk AG Reutlingen wird erworben. 1934 wird die Federwindmaschine UFM 160 für die Verarbeitung von Drähten bis 16 mm entwickelt.

In den Nachkriegsjahren mussten die Kriegseinwirkungen beseitigt werden. Das Werk in Reutlingen wird wieder aufgebaut. Mehr als ein Viertel der Belegschaft kehrt nicht aus Krieg und Gefangenschaft heim, darunter auch die Söhne von *Gerhard Ficker*. Dr. *Otto Schmid* verunglückt 1958 tödlich bei einem Autounfall. Der Betrieb wird in WAFIOS GmbH & Co. KG umgewandelt.

In Basel zeigt 1978 WAFIOS die erste elektronisch gesteuerte Federwindmaschine als Neuheit. 1985 folgt die erste Maschine mit 4-Achsensteuerung. Es folgt eine elektronisch gesteuerte Schenkelfedermaschine mit einem Multifunktionswerkzeug, wodurch der Werkzeugeinsatz in der Federindustrie erheblich reduziert werden konnte. 1990 zeigt WAFIOS die erste frei programmierbare Federenden-Schleifmaschine auf der Fachmesse „WIRE“ in Düsseldorf.

1993 begeht WAFIOS sein 100jähriges Betriebsjubiläum. In den letzten 40 Jahren hat WAFIOS 675 verschiedene Maschinenmodelle entwickelt und auf den Markt gebracht. Mit 62 Vertretungen in allen Erdteilen wird Kundennähe gefördert. Ab 1993 erfolgen die Entwicklung eines Multischnittsystems für eine rationellere Druckfedernfertigung, das graphische Programmiersystem WPS zur Erleichterung der Maschinenbedienung und ein CNC-gesteuertes Biege- und Wickelzentrum der Baureihe FMU.

Die Umwandlung in eine Aktiengesellschaft folgt. Zum 110jährigem Firmenjubiläum 2003 kann festgestellt werden, die WAFIOS AG belieferte bisher mit einem Exportanteil von ca. 75% 118 Länder mit ihren Produkten.

### 7.3.3 Schlosser und Maschinenbau

#### 7.3.3.1 Johann Vitz GmbH & Co. KG in Velbert [7.20]

Das Unternehmen wird 1908 als Maschinenfabrik durch *Johann Vitz* und Söhne gegründet. Für die Velberter Schlossindustrie wurde ein Automat gebaut, um Schlossfedern vollautomatisch zu produzieren. Diese Federn wurden zur damaligen Zeit mit großem Aufwand manuell hergestellt. Die Produktion von Schlossfedern wurde mit dieser Maschine selbst aufgenommen und damit der Grundstein zur heutigen Firma Johann Vitz GmbH & Co. KG in Velbert gelegt.

Im 1. Weltkrieg kam die Federnproduktion weitgehend zum Erliegen. Es wurden mit Gas betriebene Kohlenanzünder gefertigt. Zwei der Söhne, *Emil* und *Paul Vitz* wurden Opfer des Krieges.

In den Jahren nach dem 1. Weltkrieg entwickelte sich zunächst das Unternehmen mit den Anforderungen der niederbergischen Industrie. Neben selbstgebauten Maschinen wurden weitere Automaten zur Fertigung verschiedenster Federn und Metallwaren angeschafft.

In den Jahren von 1930 bis 1940 wurden von *Ewald* und *Otto Vitz* verschiedene Erfindungen für eine verbesserte Herstellung durch Biegen und Rollen gemacht, die patentiert wurden. Eine erste Automatenhalle wurde gebaut.

Der Wiederaufbau nach dem 2. Weltkrieg war schwierig. Der große Durchbruch wurde durch die Entscheidung von *Emil* und *Friedhelm Vitz* ausgelöst, am Stadtrand von Velbert eine neue Firma zu bauen. Der Umzug des Unternehmens in das neue Industriegebiet Velbert/West erfolgte 1963.

2004 kann festgestellt werden, dass das Familienunternehmen bereits in der 4. Generation erfolgreich in Velbert geführt wird. Als geschäftsführender Gesellschafter ist seit Jahren *Michael Vitz* tätig

#### 7.3.3.2 Dr. Werner Röhrs KG in Sonthofen [7.4]

Der Ingenieur *Hermann Röhrs* gründet am 1. November 1919 in Magdeburg die Firma „Röhrs & Co. OHG Magdeburg“. Es erfolgt der Erwerb der „1. Magdeburger Spiralfedernfabrik“. *Hermann Röhrs* baut die Federnfabrik als Zulieferant für das nahe und weitere Industriegebiet Magdeburg, bis nach Danzig, Königsberg und Breslau aus.

1932 wird Dr. *Werner Röhrs* persönlich haftender Gesellschafter des Unternehmens und übernimmt die Geschäftsführung. Unter seiner Leitung entwickelt sich die Firma zu einem Spezialunternehmen für die Herstellung technischer Federn für hohe Schwingungsbeanspruchung sowie hohe Beschleunigungen.



nigung. Das Unternehmen erlangt mit über 400 Mitarbeitern und einem Zweigbetrieb in Quedlinburg infolge intensivster Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie grundlegender Patente einen angesehenen Ruf im In- und Ausland.

1945 wird das Werk in Magdeburg durch Bombenangriffe fast vollständig zerstört. Als dann die Zonengrenze des geteilten Deutschlands geschlossen wird, befindet sich Dr. *Werner Röhrs* auf einer Geschäftsreise in Süddeutschland. Aufgrund der Schließung der Demarkationslinie durch die Russen kann er nicht mehr nach Magdeburg zurückkehren. Er erwirbt in Sonthofen/Allgäu die „Süddeutsche Autogen-Gesellschaft m.b.H.“, die zunächst Schweißapparate herstellt. Es folgt 1955 Landerwerb und Fabrikneubau in Sonthofen und die Umfirmierung des Unternehmens in „Dr. Werner Röhrs KG Fabrik für Stahlverformung Sonthofen/Allgäu.“

1961 werden die GmbH-Anteile des Handelsunternehmens „BALI-Olympic-Geräte GmbH“ Stuttgart erworben und die Schenkelfederproduktion für BALI-Impander aufgenommen. Das Produktionsprogramm vergrößerte sich erheblich. Es umfasst die Herstellung von hitzebeständigen Stahlteilen, Apparate für die chemische Industrie und Trommelläuferventilatoren. Entwicklungsaufträge der Federfabrik von namhaften Unternehmen der Metallindustrie steigen stetig an

In den Jahren nach 1964 erfolgt der Bau und die Inbetriebnahme einer dynamischen Prüfmaschine zur Prüfung schlagartig beanspruchter Federn und eine Fabrikerweiterung sowie der Bau eines firmeneigenen Schleppliftes in Oberstaufen für Versuchszwecke. Die Federn-Abteilung entwickelt ein neues spanabhebendes Verfahren zur Herstellung schlagartig beanspruchter Formfedern. Die Federprüftechnik wird erweitert. Eine weitere Produktionshalle wird gebaut und das Verwaltungsgebäude erweitert.

1987 tritt Frau Dr. *Konstanze Koepf-Röhrs* in das Familienunternehmen ein. Es werden weitere Grundstücke erworben, eine neue Produktionshalle gebaut und Ende der 1980er Jahre die Produktion von Ventilatorrädern aufgenommen. 1995 wird eine neue Walzstraße aufgenommen.

Frau Dr. *Konstanze Koepf-Röhrs* übernimmt 1991 nach dem Tod ihres Vaters die Führung des Unternehmens. Heute arbeitet das Unternehmen auf einer Fertigungsfläche von 11.000 Quadratmetern und ist ein Spezialist für die Entwicklung, Fertigung und Erprobung von besonders hochwertigen technischen Federn, insbesondere für die Fertigung von Federn für hohe Schwingungsbeanspruchung und schlagartige Beschleunigungen.

Unter der Führung von Frau Dr. *Koepf-Röhrs* (später mit Sohn Dr. *Klaus-Philipp Koepf*) hat sich das Unternehmen, das hauptsächlich als Zulieferer im wehrtechnischen Bereich aktiv war, nun auch als Zulieferer im zivilen Bereich etabliert. Hierbei war die Entwicklung von der Runddraht- zur

Flachdrahtfeder mittels neuester Walztechnologie entscheidend. Die Firma Röhrs versteht sich nach wie vor als ein individueller Problemlöser und entwickelt Federn aus neuesten Materialien (z.B. Inconel , bis 600°C).

Spezialität sind Federkombinationen aus mehreren Einzelfedern unterschiedlichster Bauart, um in kleinen Einbauräumen und schwierigen Umweltbedingungen höchste Leistung und maximale Lebensdauer zu erreichen. Zur erweiterten Produktpalette gehören auch Feder-Systemlösungen wie zum Beispiel Schwingungsdämpfer oder Maschinenlagerungen für den allgemeinen Maschinenbau.

### 7.3.4 Uhren- und Feinwerktechnik

#### 7.3.4.1 Hugo Kern und Liebers GmbH & Co. KG in Schramberg [7.2][7.18]

*Hugo Kern* beginnt 1888 in Schramberg die Produktion von Zugfedern für die Schwarzwälder Uhrenindustrie. In den folgenden Jahren wird das Firmengebäude mehrere Male erweitert und das Unternehmen erwirbt Spezialkenntnisse in der Herstellung von Federn. 1920 übernimmt *Ernst Hugo Kern*, Sohn von *Hugo Kern*, das Unternehmen und wandelt es in die Hugo Kern KG um. 1936 tritt Dr. rer. pol. *Kurt Steim*, Enkel von *Hugo Kern*, nach dem Tode von *Ernst Hugo Kern* als Geschäftsführer in die Firma ein.

Nach dem 2. Weltkrieg erfolgt der Aufbau der Platinenproduktion (Stanzteile für den Textilmaschinenbau und die Textilindustrie). Das dadurch erworbene Know-how ermöglicht in den folgenden Jahren die Erweiterung des Produktionsprogramms um Feinschneid-/Stanzteile in höchster Präzision.

Der automatische Sicherheitsgurt zur Unterstützung der passiven Personensicherheit hält 1965 Einzug in den Automobilen. Die Hugo Kern KG erkennt das Marktpotenzial für dabei eingesetzte Rückholfedern und ist von Anfang an Entwicklungspartner der Gurt-, Automobil- und Stahlhersteller.

1971 erfolgt die Fusion der Hugo Kern KG mit der Platinenfabrik Liebers & Co. in Ingolstadt zur Hugo Kern und Liebers GmbH & Co.. Die Marke „KERN-LIEBERS“ entsteht. Es folgt 1975 der Fertigungsbeginn der KERN-LIEBERS USA INC. in Toledo/Ohio. Das sind die ersten Schritte in der Internationalisierung des Unternehmens.

Dipl.-Kfm. *Robert Drost*, Schwiegersohn von Dr. *Kurt Steim*, wird 1978 Vorsitzender der Geschäftsführung. Dr. *Hans-Jochem Steim*, Sohn von Dr. *Kurt Steim*, wird zum Geschäftsführer bestellt. 1981 erfolgt die Übernahme der Federnsparte der J.N. EBERLE & CIE. GmbH Augsburg und die Gründung der J.N. EBERLE FEDERNFABRIK GmbH in Schwabmünchen.

Dr. *Hans-Jochem Steim* wird 1991 Vorsitzender der Geschäftsführung. 1999 erfolgt eine Umstrukturierung des Stammwerkes. Die Sparten Trieb- und Rollfedern, Drahtfedern, Feinschneid-/Stanzteile und Dosiertechnik sind eigenständige Einheiten, die ihre Märkte weitgehend autonom und global mit Unterstützung der ausländischen Werke bearbeiten.

Ab 2002 kommt es zu verschiedenen Angliederungen von Federwerken u.a. zur Mehrheitsbeteiligung an der KURT MEDER GmbH Villingen-Schwenningen und Ausbau des Drahtfedernprogramms, der Übertragung der Sparte Dosiertechnik auf die Rampf-Gruppe und der Mehrheitsbeteiligung an der BOHNERT GmbH Hardt mit weiterem Ausbau des Drahtfedernprogramms sowie über die Bohnert GmbH Mehrheitsbeteiligung an der THÜRINGER PRÄZISIONSFEDERNFABRIK GmbH Ruhla und der Mehrheitsbeteiligung an der GEBRÜDER SCHMIDT GmbH Wuppertal mit Ausbau des Bandfedernprogramms.

Erweiterungen gab es ferner durch Übernahme der SAXONIA INTERNATIONAL BV mit der Saxonía Umformtechnik GmbH in Göppingen, der Paul Leistner GmbH in Schwabach und weiteren Werken in Tschechien, Malaysia, China, Hongkong und den USA. Das Platinen- und Stanzteilprogramm wurde ausgebaut.

#### 7.3.4.2 Gebrüder Schmidt GmbH in Wuppertal [7.1][7.22]

Am 1. Mai 1880 gründen die Brüder *Albert* und *Hermann Schmidt* die Firma Gebr. Schmidt in Cronenberg/Wuppertal. Betrieben wird die Fabrikation von Sägen. Frühere Ursprünge der Firma: *Johann Abraham Schmidt* (geb. 1792) betreibt in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts einen Wasserhammer und beginnt mit der Sägenproduktion. Sein Sohn *Eduard* und später dessen Söhne, die Gebr. Schmidt, bauen hierauf auf.

*(Gemäß dieser Vorgeschichte würde diese Firma in die unter Abschnitt 7.3.1 beschriebenen Betriebe gehören. Ihr heutiges Produktionsprofil mit Spiralfach- und Rollenfedern passt jedoch besser in diese Gruppe.)*

Um 1900 erfolgt die Erweiterung der Fertigung, der Handel mit Werkzeugen und Maschinenmessern sowie der Beginn der Fabrikation der ersten Federn aus Flachstahl.

Von 1918 bis 1940 nehmen die Federn mehr und mehr die beherrschende Rolle im Fertigungsprogramm ein. Inzwischen arbeitet auch *Albert Schmidt*, Sohn von *Albert Schmidt* sen. im Unternehmen mit. 1942 wird die Produktion völlig auf die Herstellung technischer Federn umgestellt.

1953 tritt *Horst Albert Schmidt* in die Firma seines Vaters ein, die er nach dessen Tod 1958 voll übernimmt. Die folgenden Jahre sind geprägt von

einem stetigen Ausbau der Federnproduktion mit der Spezialisierung anfangs auf Spiral- und Hülsenfedern und der Erstellung moderner Erweiterungsbauten. Später wird das Fertigungsprogramm erweitert mit Flachformfedern, Stanz- und Biegeteilen sowie Rollfedern.

1990 scheidet *Horst Albert Schmidt* aus dem aktiven Unternehmensgeschehen aus. Die Söhne *Christian* und *Andreas Schmidt* übernehmen nach und nach die unternehmerische Verantwortung.

Um vor allem auch den globalen Ansprüchen der Kunden zu entsprechen, schließt sich im Jahr 2004 die Firma GEBR. SCHMIDT der weltweit aufgestellten KERN-LIEBERS-Firmengruppe an. Es erfolgen beidseitige Verlagerungen, um Produktionskapazitäten zusammenzufassen. Die Firma GEBR. SCHMIDT erhält hierdurch ein eigenes Profil innerhalb der KERN-LIEBERS-Firmengruppe als Competence-Center für Spiral-, Roll- und Hülsenfedern. GEBR. SCHMIDT ist der anerkannte Spezialist für diese Produktgruppen und kann seine Marktführerschaft in bestehenden Marktsegmenten ausbauen.

#### 7.3.4.3 Federnfabrik Dietz GmbH in Neustadt bei Coburg

Das Unternehmen wird 1928 von *Herrmann Dietz* gegründet. Der Kundenkreis kam aus der Spielwaren- und Puppenindustrie. Es wird mit der Herstellung von Druckfedern und Drahtbiegeteilen in Handarbeit begonnen. 1956 erfolgte der Kauf der ersten Federwindmaschine (HACK UFA 2).

1961 wird die Firma von *Peter Dietz* übernommen und mit dem Neubau der ersten eigenen Produktionsstätte begonnen. In der Folge wurde ein eigener Werkzeugbau aufgebaut und eine Stanz- und Umformabteilung eingerichtet. Der erste Bihler-Automat wurde gekauft. 1969 wurde die Zugfedernproduktion aufgenommen.

1982 trat das Unternehmen dem Verband der deutschen Federnindustrie (VDFI) bei. Die Zertifizierung nach DIN ISO 9002 folgte 1995.

In den Folgejahren wurde eine Automatisierungs- und Montageabteilung aufgebaut und das Angebot um die Produktion von Baugruppen erweitert. Die Zertifizierung des QM-Systems nach ISO/TS 16949 folgte 2002 und ein Jahr später die Gründung eines Tochterunternehmens in der Tschechischen Republik. Die Geschäftsführung erfolgt durch *Peter* und Dipl. Wirtsch.-Ing. *Matthias Dietz*.

## 7.4 Verband der Deutschen Federnindustrie (VDFI)

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts nahm die Nachfrage an Federn infolge der Entwicklung des Eisenbahnwesens und damit auch die Anzahl der Fertigungsstätten für Federn zu. Nach der Gründung des Deutschen Reiches 1871 übernahm der preußische Staat zudem in den Jahren bis 1882 die bis dahin privaten Eisenbahnen auf seinem Territorium. Schließlich schlug der Wirtschaftsaufschwung in Gründerkrach und Wirtschaftsflaute um. Offensichtlich sind diese drei Entwicklungen die wesentlichen Gründe zu Reaktionen einiger namhafter Unternehmen, die auch Eisenbahnfedern herstellten.

Um einen ungesunden Wettbewerb zu verhindern und die gemeinsamen Interessen der Federn- und Zulieferwerke zu fördern, schlossen sich einige Federnbetriebe und Stahlwerke (meist aus dem Ruhrgebiet) am 04.08.1882 zu einer Federngemeinschaft zusammen. Es waren dies die Firmen Friedrich Krupp AG (Essen), Bochumer Verein für Bergbau und Gussstahlfabrikation (Bochum), Sächsische Gussstahlwerke Döhlen AG (Dresden) und Hagener Gussstahlwerke (Hagen). In der Vereinbarung dieser Federngemeinschaft wurden u.a. die prozentualen jährlichen Lieferanteile von Schienenfahrzeugfedern festgelegt. Das Datum der Vereinbarung dieser „Federngemeinschaft“ wird als Ursprung des Verbandes der Deutschen Federnindustrie angesehen [7.12].

Bis 1911 treten dieser Gemeinschaft die Firmen Dittmann & Neuhaus (Herbede, 1890), van der Zypen & Charlier (Köln-Deutz, 1892), Schmitz & Steffen (Hagen, 1895), Hochfelder Walzwerke (Duisburg, 1899), Eicken & Co. (Hagen, 1902), Westfälische Stahlwerke (Bochum, 1905), Brenne, Hangarter & Co. (Haspe, 1905), Dortmunder Union (Dortmund, 1911) und Vereinigte Königs- und Laurahütte AG (Berlin, 1911) bei.

Als das bisher älteste überlieferte Dokument liegen die Verträge der „Federngemeinschaft“ vom 01.01.1914 vor. Es enthält drei Verträge, nämlich zu „Lokomotiv- u. Tendertragfedern“, „Wagentragfedern“, sowie „Spiralfedern“ (Kegelstumpffedern aus Flachmaterial). Zweck der Gemeinschaft ist es, „einen ungesunden Wettbewerb“ zu verhindern und die gemeinsamen Interessen der vereinigten Werke zu fördern.“

Der ruinöse Wettbewerb nach dem 1. Weltkrieg führt 1920/21 zum Zusammenschluss der 20 wichtigsten Hersteller von Schienenfahrzeugfedern zu einer Federngemeinschaft mit dem Ziel, die gemeinsamen Interessen zu fördern. Die Vereinigung legt für jedes Mitglied Produktionsquoten fest. So wurden der Friedrich Krupp AG und dem Bochumer Verein mit je 15,22 % die höchsten Quoten zugesprochen. Auch von einem „Deutschen Wagenfe-

derverband“ wird berichtet, der jedoch im Jahre 1930 wegen des Rückgangs in der Herstellung von Kutschwagenfedern seine Aktivitäten einstellt. 1926 fand eine Umgründung zum Deutschen Federn-Verband mit Sitz in Hagen statt. Mit den Verträgen vom 01.01.1926 entsteht der „Deutsche Federn-Verband GmbH“, Bochum. Dies ist die Umgründung der „Federngemeinschaft“. In der Gesellschaftsform der GmbH konnte eine wesentlich gefestigtere und solidere Verbandspolitik betrieben werden als in der bisherigen Gemeinschaft mit relativ lockerem Zusammenhalt. Die Mitglieder übertragen dem Verband den Verkauf der diesem Vertrag unterliegenden Federn. Der Verband bietet die zur Anfrage gelangenden Mengen im Namen der Mitglieder an und behält sich die Verteilung der Mengen für den Auftragsfall vor. Im Jahre 1934 wird der Sitz des Deutschen Federn-Verbandes von Bochum nach Hagen verlegt.

Die Auswirkungen der Weltwirtschaftskrise führen in Eisenach zur Gründung der „Gemeinschaft der Federnwerke“, deren Mitglieder Automobilersatzfedern herstellen. Sitz der Gemeinschaft ist Hagen. Zwei Jahre später wird zusätzlich eine „Exportgemeinschaft der Federnwerke“ gegründet und im Jahre 1936 ein „Anhängersfedern-Verband“ hinzugefügt. Mit einer neuen Satzung der „Gemeinschaft der Federnwerke“ werden im Jahre 1939 die bisherigen Gemeinschaften

1. Gemeinschaft der Federnwerke (Automobilersatzfedern)
2. Exportgemeinschaft der Federnwerke
3. Anhängerfedern-Hersteller

mit Sitz in Hagen zusammengefasst.

Wegen der unauskömmlichen Preise entsteht 1933 auch die Autofedern-Vereinigung in Düsseldorf, deren Mitgliedsfirmen Automobil-Serienfedern herstellen.

Der Reichswirtschaftsminister verlangt von der Wirtschaftsgruppe „Werkstoffverfeinerung und verwandte Eisenindustriestämme“ im Rahmen der Marktaufichtsverordnung vom 20.10.1942 Vorschläge zu unterbreiten, welche Kartelle aufzulösen sind, welche Verbände in die Wirtschaftsgruppe überführt werden können, welche Syndikate aus volkswirtschaftlich wichtigen Gründen bestehen bleiben müssen und in welchem Rahmen und Umfang markt- und preisregelnde Zusammenschlüsse noch selbständig bestehen bleiben sollen. Die Wirtschaftsgruppe war gehalten, hierbei den schärfsten Maßstab anzulegen und Auflösungen bzw. Überführungen in die Gruppe weitestgehend durchzuführen. Hieraus resultiert die Zusammenlegung der „Gemeinschaft der Federnwerke (Automobilersatzfedern)“ und der „Autofedern-Vereinigung“ im Oktober 1943 und schließlich unter Einschluss des „Deutschen Federn-Verband“ am 24.02.1944 die Gründung des „Gesamtverband Deutscher Federnwerke“ mit den (Fach-)Abteilungen

I. Schienenfahrzeugfedern,  
 II. Straßenfahrzeugfedern für Fahrzeughersteller als Großbetriebe  
 und

III. Straßenfahrzeugfedern für Händler, Reparaturwerkstätten, handwerksmäßige Fahrzeughersteller und Abnehmer ähnlicher Art.  
 Der neue Gesamtverband nennt sich nach dem 2. Weltkrieg zunächst „Fachverband Federn“. Er ist damit Standesorganisation für die Fachvereinigungen Schienenfahrzeugfedern, Straßenfahrzeugfedern und Kaltgeformte Federn.

Die „Forschungsgemeinschaft warmgeformte Federn“ wird 1958 gegründet, um der zunehmenden Wichtigkeit technischer Fragen durch Forschungsarbeiten unter Beteiligung von Hochschulinstituten gerecht zu werden.

Im Jahre 1959 veranstaltet der Verband seine erste größere Internationale Federntagung in Bad Godesberg mit zahlreichen technischen Vorträgen und Teilnehmern aus Frankreich und England.

Zur weiteren Straffung der Verbandsarbeit werden die Fachvereinigungen Schienenfahrzeugfedern und Straßenfahrzeugfedern zur Fachvereinigung „Warmgeformte Federn“ am 01.07.1960 vereinigt.

Nach 1962 erfolgt die Umbenennung in „Verband der Deutschen Federnindustrie“ (VDFI) mit den Abteilungen „Fahrzeugfedern“ und „Kaltgeformte Federn“. Sitz des Verbandes ist Hagen.

Anfang 1968 wird vereinbart, die Fachabteilungen „Fahrzeugfedern“ und „Kaltgeformte Federn“ unter einem Geschäftsführer zusammenzulegen. Neben der Stärkung der Repräsentation der Federnindustrie nach außen waren es auch Überlegungen zur notwendigen Zentralisierung der Führungsaufgaben, Vermeidung von Doppelgleisigkeit in dem Zielstreben unterschiedlicher Geschäftsführungen, dadurch Wegfall manchmal unausbleiblicher langwieriger Harmonisierungsverhandlungen, sofortiger, wenn nötig, massiver Einsatz bei Schwerpunktproblemen, Rationalisierung der internen Verbandsarbeit und Einrichtungen, bessere Personalauslastung und damit Kosteneinsparung.

Der VDFI ist durch die Mitgliedschaft im Wirtschaftsverband Stahl- und Metallverarbeitung im Bundesverband der Deutschen Industrie vertreten sowie Mitglied des European Spring Federation (ESF). Es bestehen gute Kontakte zum amerikanischen sowie japanischen Federnverband.

Der Verband der Deutschen Federnindustrie (VDFI) beging 2007 in Gelsenkirchen im Rahmen seiner Jahreshauptversammlung festlich sein 125-jähriges Bestehen .

Die ausführliche Darstellung des Entwicklungsganges des Verbandes der deutschen Federnindustrie wird in der Festschrift/Chronik zum 125-jährigen Jubiläums [7.12] vorgenommen.

## 7.5 Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Metallfedern und der Federntechnik

Der Bedarf an Erkenntnissen zur Berechnung und Konstruktion von Federn, zur Ertragbarkeit der Beanspruchungen der verschiedensten Federwerkstoffe, deren Entwicklung Ende des 19. und mit Beginn des 20. Jahrhunderts große Fortschritte machte, und die Technik zur Herstellung der unterschiedlichsten Federn nahm zu Beginn des 20. Jahrhunderts stark zu. Verschiedene Einrichtungen und auch viele Einzelpersönlichkeiten (s. Kapitel 5) bemühten sich um Fortschritte in der Federntechnik.

Und wieder war es das Eisenbahnwesen, von dem viele Initiativen ausgingen. So waren es beispielsweise die grundlegenden Untersuchungen von *August Wöhler* um 1860 zum Dauerschwingverhalten von Werkstoffen, die die Möglichkeit eröffneten, die Lebensdauer der Bauteile abzuschätzen. Die Bemühungen von *Carl Bach* wiederum bildeten die Grundlage für einen sicheren Bauteilentwurf.

Von der Reichsbahn in Verbindung mit dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und dem Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) wurden 1929 erste gemeinschaftliche Forschungsarbeiten an Federn angeregt und die Gründung des Fachausschusses Federn eingeleitet [7.12]. In den beiden Unterausschüssen „Fertigungsausschuss“ (Werkstoffausschuss) beim VDEh und dem „Bauartenausschuss“ beim VDI wurden über 10 Jahre lang vor allem Werkstoff- und Verarbeitungsfragen behandelt [7.12].

In den 1930er Jahren wurde unter Leitung von *Dr. Ernst Lehr* in Nürnberg ein Versuchsinstitut für Federn aufgebaut. Hier nahmen die bereits in Kapitel 5 geschilderten praktischen Arbeiten und theoretischen Abhandlungen zu Federn ihren Ausgangspunkt, die schließlich in dem bereits angeführten Buch zusammen mit *Siegfried Gross* [5.48] 1938 publiziert wurden.

Anfang der 1940er Jahre sind umfangreiche Untersuchungen zu Stoßbelastungen an Federn von *Karlheiz Walz* in den Mauserwerken in Oberndorf gemacht worden, die in einem umfangreichen Bericht 1943 veröffentlicht wurden [4.95].

Umfangreiche Untersuchungen zum Dauerschwingverhalten von Federn und Federwerkstoffen, in deren Rahmen auch zahlreiche Einflussfaktoren auf die Dauerfestigkeit untersucht wurden, sind in den 1950er Jahren am Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf von *Anton Pomp* und *Max Hempel* (s. Abschnitt 5.6.2) durchgeführt worden.

Die Wichtigkeit der Klärung zahlreicher technischer Fragen und Probleme führte 1958 zur Aufnahme von Forschungsarbeiten der „Forschungsgemeinschaft Warmgeformte Federn“ und auch der „Forschungsgemeinschaft



Kaltgeformte Federn“. Die „Forschungsgemeinschaft Kaltgeformte Federn“ in der „Fachvereinigung Kaltgeformte Federn“ arbeitete mit verschiedenen Forschungseinrichtungen, u.a. mit der RWTH Aachen, zusammen. Eine Reihe werkstofftechnischer Untersuchungen an Federn (vor allem Blattfedern) und Federwerkstoffen sind von Prof. *Kloos* und Dr. *Bruno Kaiser* an der TH Darmstadt in den letzten 30 Jahren durchgeführt worden.

Fragen zur Berechnung von Tellerfedern und anderen Federelementen sind in den letzten 40 Jahren von Prof. *Peter Niepage* im Rahmen von Forschungsvereinbarungen mit der Fa. Muhr & Bender, Attendorn, behandelt worden.

Größere Betriebe der Federnindustrie richteten eigene Forschungs- und Entwicklungsabteilungen ein. Neben Prüfungen der Zuverlässigkeit und Lebensdauer im Rahmen von Dauerschwingversuchen wurde auch die Entwicklung spezieller Verfahren der Federproduktion vorgenommen (z.B. Scherdel-Ultra-Verfahren). Erwähnt werden sollen in diesem Zusammenhang auch die Arbeiten von *Joachim Huhnen* in der Forschungs- und Entwicklungsabteilung der Bosch-Werke in Stuttgart.

In mehr als 50 Jahren wird in den diversen technischen Arbeitsgruppen des Verbandes der Deutschen Federnindustrie insbesondere die spezielle Normung der Werkstoffe, Halbzeugabmessungen und Konstruktionen für Federn bearbeitet und dem jeweiligen Erkenntnisstand angepasst sowie in Forschungsprojekten unter Einbindung von Hochschulinstituten das Grundlagenwissen erweitert. Zahlreiche Dissertationen basieren auf Arbeiten für den VDFI, der in Kurzform die Ergebnisse aller Forschungsprojekte herausgibt. Mit den folgenden Einrichtungen

- der Technischen Hochschule Darmstadt,
- der Ruhruniversität Bochum,
- der RWTH Aachen,
- der Märkischen Fachhochschule Iserlohn,
- der Technischen Universität Ilmenau und
- der Technischen Universität Bergakademie Freiberg sowie
- dem MPIE Düsseldorf

erfolgte in dieser Zeit auf dem Gebiet der Federnforschung eine erfolgreiche Zusammenarbeit, wobei die in den **Tafeln 7.1** und **7.2** aufgeführten Themen und Forschungsprojekte bearbeitet wurden.

Am Institut/Fachgebiet Maschinenelemente der TH/TU Ilmenau wurden seit 1962 zahlreiche Untersuchungen zur Berechnung und zum Dauerfestigkeitsverhalten von Federn (Vertragsarbeiten mit dem VEB Draht- und Federwerke Karl-Marx-Stadt, dem VEB Kombinat Carl Zeiss Jena und dem

VEB Relastechnik Großbreitenbach) sowie ab 1992 auch zu Fragen der Fertigung/Technologie von Federn durchgeführt [7.26]. Im Rahmen dieser Forschungsarbeiten entstanden z.B. die in **Tafel 7.3** aufgeführten Dissertationen. Das 1962 eingerichtete Federnlabor wurde ab 1992 in enger Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Rechneranwendung im Maschinenbau (Leiter Prof. Dr. *Mathias Weiß*) mit Unterstützung des VDFI und vieler Federnherstellerfirmen wieder neu aufgebaut und mit einer Reihe neuer Prüfeinrichtungen ausgerüstet.

**Tafel 7.1.** Forschungsprojekte der Forschungsgemeinschaft warmgeformte Federn/Fahrzeugfedern ab 1958 (jeweils Beginn der Arbeiten)

<b>Jahr</b>	<b>Thema</b>	<b>Forschungs- stelle/Bearbeiter</b>
1958	Dauerversuche an Schraubendruckfedern Untersuchungen an Schraubenfedern und zum Werkstoffeinfluss an Federstäben Dauerbiegeversuche an Flachfederstäben	Berlin-Dahlem/Prof. <i>Amedick</i> Bundesbahn Darmstadt
1960	Festigkeitsuntersuchungen zur Ermittlung optimaler Strahlbedingungen von Schrauben- und Torsionsfe- dern Dauerbiegeversuche an Originalflachfederstäben mit verschiedenen Blattstärken und Oberflächenausfüh- rungen	
1963	Kennzeichnung der Vertrauensbereiche der Dauer- schwingfestigkeit von warmgeformten Schraubenfe- dern und der Dauerbiegefestigkeit von Blattfedern	
1964	Untersuchung der Dauerschwingfestigkeit im Schwellbereich mit geschichteten Blattfedern	LBF Darmstadt/Dr. <i>Svenson</i> , DI <i>Grubisic</i>
1966	Kennzeichnung der Vertrauensbereiche der Dauer- schwingfestigkeit von warmgeformten Schrauben- druckfedern Schwingversuche mit Federstäben unter Umlaufbie- gebeanspruchung Schwingbiegeversuche an Blattfederstäben	BAM Berlin  BAM Berlin/LBF Darmstadt
1969	Untersuchung der Schwingfestigkeit viellagiger LKW-Blattfedern Dauerhaltbarkeit von Schraubenfedern in Abhängig- keit vom Wickelverhältnis und Oberflächenzustand	LBF Darmstadt  TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> / Prof. <i>Wiegand</i>
1971	Grenzen des Plastizierens Untersuchung der Einflüsse des Reinheitsgrades auf die Dauerfestigkeit eines vergüteten und vergütet- kugelgestrahlten Federstahls	BAM Berlin; Prof. <i>Amedick</i> TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i>
1977	Einflüsse von Randentkohlung und Kugelstrahlbe- handlung auf die Dauerfestigkeit eines vergüteten Federstahls	TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Dr. <i>Kaiser</i>

**Tafel 7.1.** Forschungsprojekte der Forschungsgemeinschaft warmgeformte Federn/Fahrzeugfedern ab 1958 (Fortsetzung)

<b>Jahr</b>	<b>Thema</b>	<b>Forschungs- stelle/Bearbeiter</b>
1981	Tieftemperaturverhalten von Federstahl Ersatz der Stahlblatfeder bei Nutzfahrzeugen durch Kunststofffedern	TU Bochum; Prof. <i>Berns</i> Studie von Harbridge-House, Deutschland
1982	Kälteverhalten von Parabelfedern	TU Bochum; Prof. <i>Berns</i>
1984	Einfluss von Legierungselementen insbesondere Silizium auf Abkühlung, Setzverhalten und Lebens- dauer von Federwerkstoffen Schwingfestigkeit von Federstählen unter Korrosi- onseinfluss	TU Bochum; Prof. <i>Berns</i> , Herr <i>König</i>  TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
1985	Eigen Spannungsmessungen an schlussvergüteten und kaltgewundenen Schraubenfedern	
1987	Einfluss verschiedener Randschichtzustände auf die Schwingfestigkeit hochvergüteter Parabelfedern	TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
1989	Einfluss unterschiedlicher Anlassbedingungen auf das Verhalten von Federstählen hoher Festigkeit bei schwingender Beanspruchung Einfluss unterschiedlicher Anlassbedingungen auf die Zähigkeit hochfester Federstähle	TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Dr. <i>Kaiser</i>  TH Aachen; Prof. <i>Dahl</i> , DI <i>Holland</i>
1991	Literaturrecherche MAF-Verfahren (Tuflex Spring)	MPIE Düsseldorf
1992	Elektrochemische Prüfmethode zur Bewertung von Beschichtungssystemen auf Federn Elektrochemische Untersuchung organischer Lacke auf Federstahl unter schwingender Beanspruchung Verbesserung mechanischer Eigenschaften von Federstählen durch Mikrolegierung und thermome- chanische Behandlung	MFH Iserlohn; Prof. <i>Schmidt</i>  TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Dr. <i>Kaiser</i> MPIE Düsseldorf; Prof. <i>Pawelski</i> , Dr. <i>Kaspar</i> , Herr <i>Peters</i>
1993	Untersuchung der Schwingfestigkeit unterschiedlich beschichteter, hochfester Nutzfahrzeug-Bauteile unter Korrosionseinfluss	TH Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
1994	Übertragbarkeit metallkundlicher Erkenntnisse thermomechanisch behandelter Federstähle ...	TU Bergakademie Freiberg; Prof. <i>Lehnert</i> , Dr. <i>Lehmann</i> , DI <i>Arndt</i>
1995	Einflussmöglichkeiten auf die Wirkung von Begleit- elementen in hochfesten Federstählen	MPIE Düsseldorf; Prof. <i>Pawelski</i> , Dr. <i>Kaspar</i> , Herr <i>Wettlaufer</i>
1998	Schwingversuche an Einblattparabelfedern der Federstahlsorten 50CrV4 und 50CrV4+Nb ...	TH Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
2000	Verbesserung des Korrosionsschutzes für höherfeste Nutzfahrzeugbauteile	TH Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
2001	Standardisierte Berechnungsmethoden zur Lebens- dauer vorhersage bei Schraubendruckfedern	TU Ilmenau; Prof. <i>Schorcht</i> , DI <i>Micke</i>

**Tafel 7.1.** Forschungsprojekte der Forschungsgemeinschaft warmgeformte Federn/Fahrzeugfedern ab 1958 (Fortsetzung)

<b>Jahr</b>	<b>Thema</b>	<b>Forschungs- stelle/Bearbeiter</b>
2002	Optimierung der Grenzwerte von Begleitelementen durch innovative Behandlung SiCr-legierter hochfester Stähle für Schraubenfedern	Max-Planck-Institut für Eisenforschung (MPIE) Düsseldorf; Prof. <i>Neumann</i> , Dr. <i>Ponge</i>
2005	Untersuchungen des Korrosionsschutzes an Schraubenfedern für Schienenfahrzeuge	TU Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
2008	Lebensdauervorhersage von Schraubendruckfedern	TU Ilmenau; Prof. <i>Kletzin</i> , DI <i>Reich</i>

**Tafel 7.2.** Forschungsprojekte der Forschungsgemeinschaft kaltgeformte Federn ab 1958 (jeweils Beginn der Arbeiten)

<b>Jahr</b>	<b>Thema</b>	<b>Forschungs- stelle/Bearbeiter</b>
1958	Dauerschwingfestigkeit von Schraubendruckfedern	TH Aachen; Dr. <i>Scharwächter</i>
1965	Einfluss der Zugfestigkeit auf die Dauerschwingfestigkeit von ölschlussvergütetem Ventildraht	TH Aachen; Prof. <i>Lücke</i>
1967	Dauerhaltbarkeitseigenschaften von Schraubenfedern in Abhängigkeit vom Wickelverhältnis ... (s.a. Tafel 7.1) Dauerschwingfestigkeit von Federn aus rostfreien Stahldrähten	TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Prof. <i>Wiegand</i> , DI <i>Kaiser</i> , Vorversuche DI <i>Huhnen</i> TH Clausthal; Prof. <i>Funcke</i>
1969	Einfluss der Fertigungsbedingungen des Drahtziehens auf die Festigkeitseigenschaften von Schraubenfedern ...	TH Darmstadt; Prof. <i>Wiegand</i>
1972	Setzen von Schraubendruckfedern aus patentiert und federhart gezogenem Rundstahldraht	Fa. W. Berg; Herr <i>Gratzer</i>
1973	Ermittlung von Verformungseigenschaften von Cu-Legierungen nach DIN 17682	
1978	Dauerfestigkeitsuntersuchungen an biegebeanspruchten Federn aus Federbandstahl	TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
1985	Untersuchung der Dauerfestigkeit an biegebeanspruchten Blattfedern und Drahtbiegeteilen ...	TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
1988	Experimentelle Ermittlung von Dauerfestigkeitsschaubildern für biegebeanspruchte Federbänder und Federdrähte	TH Darmstadt; Prof. <i>Kloos</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
1990	Qualitätsverbesserung bei gezogenen Federdrähten in Bezug auf Drallfreiheit, Rundheit, Welligkeit ...	SRAMA und TH Karlsruhe; Prof. <i>Macherrauch</i>
1992	Quereigenfrequenzen von zylindrischen Schraubenfedern aus runden Drähten	TU Ilmenau; Prof. <i>Schorcht</i> , DI <i>Lutz</i>

**Tafel 7.2.** Forschungsprojekte der Forschungsgemeinschaft kaltgeformte Federn ab 1958 (jeweils Beginn der Arbeiten; Fortsetzung)

<b>Jahr</b>	<b>Thema</b>	<b>Forschungs- stelle/Bearbeiter</b>
1994	Technologien zur Ausschussminimierung in der Schraubenfederfertigung Technische Federn mit kleinerem Einbauraum, geringerem Gewicht, größerem Arbeitsvermögen und höherer Lebensdauer	TU Ilmenau; Prof. <i>Schorcht</i> , Prof. <i>Weiß</i> , DI <i>Geinitz</i> Craft-Projekt 1342-91
1995	Gestaltabhängige Kennwerte zur Berechnung der Eigenfrequenzen von Schraubenfedern Kegelstumpffedern mit konstantem Windungsabstand, zyl. Schraubenfedern mit linear veränderlicher Steigung und zyl. Schraubenfedern mit konstanter Steigung aus Rechteckmaterial	TU Ilmenau; Prof. <i>Schorcht</i> , DI <i>Lutz</i> TU Ilmenau; Prof. <i>Schorcht</i> , DI <i>Lutz</i>
1996	Untersuchungen zur Entwicklung eines „einschlussmodifizierten“ Materials zur Herstellung hoch- und schwingungsbeanspruchter Schraubendruckfedern	VDFI-koordiniertes Projekt mit Unternehmen aus Dänemark, Deutschland, Holland und Österreich
1997	Technologien zur Herstellung von Schraubendruckfedern mit höherem elastischen Formänderungsverm. Schwingfestigkeitsuntersuchungen an einzelnen Tellerfedern und an Tellerfedersäulen bel. Schichtung	TU Ilmenau; Prof. <i>Schorcht</i> , Prof. <i>Weiß</i> , DI <i>Geinitz</i> TU Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
1999	Ermittlung von Dauerfestigkeits- und Relaxations-schaubildern für hochbeanspruchte Schraubendruckfedern	TU Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
2000	Einflüsse der End- und Übergangswindungen auf Funktion, Fertigung und Betriebsverhalten von kaltgeformten Schraubendruckfedern Ergänzende Schwingfestigkeitsuntersuchungen an einzelnen Tellerfedern und Tellerfedersäulen beliebiger Schichtung Patentiert kaltgezogene Stahldrähte für vorwiegend statisch beanspruchte Federn mit verbesserten Gebrauchseigenschaften	TU Ilmenau; Prof. <i>Schorcht</i> , Dr. <i>Lutz</i> , DI <i>Geinitz</i>  TU Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>  TU Bergakademie Freiberg; Prof. <i>Kawalla</i> , Prof. <i>Lehmann</i> , DI <i>Hoffmann</i>
2002	Einfluss von Beschichtungen auf das Lauf- und Umformverhalten von Federstahldrähten auf Federwindeautomaten	TU Ilmenau; Prof. <i>Schorcht</i> , DI <i>Geinitz</i>
2005	Ermittlung von funktions- und fertigungsrelevanten Federdrahtkennwerten (E- und G-Modul)	TU Ilmenau; Prof. <i>Weiß</i> , Dr. <i>Geinitz</i>
2007	Untersuchungen der Dauerhubfestigkeiten von Schraubenfedern im Bereich extrem hoher Schwingspielzahlen Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulation des Relaxationsverhaltens von Tellerfedern	TU Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>  TU Darmstadt; Prof. <i>Berger</i> , Dr. <i>Kaiser</i>
2009	Funktions- und fertigungsrelevante Kennwerte für Federstahldraht und Federband	TU Ilmenau; Prof. <i>Weiß</i> , Dr. <i>Geinitz</i>

**Tafel 7.3:** Zusammenstellung der an der TH/TU Ilmenau seit Bestehen des Federnlabors 1962 erarbeiteten Dissertationen auf dem Gebiet der Federntechnik

<b>Jahr</b>	<b>Autor</b>	<b>Thema</b>
1968	<i>Manfred Meissner</i>	Untersuchungen bestimmter Einflüsse auf die Dauerfestigkeit kaltgeformter zylindrischer Schraubendruckfedern. Diss. TH Ilmenau 1968.
1970	<i>Klaus Denecke</i>	Dauerfestigkeitsuntersuchungen an Tellerfedern. Diss. TH Ilmenau 1970.
1970	<i>Gotthard Mehner</i>	Beitrag zur Berechnung einer allgemeinen Schraubfeder. Diss. TH Ilmenau 1970.
1971	<i>Erich Unbehaun</i>	Beitrag zur optimalen Dimensionierung von Kontaktblatffederkombinationen. Diss. TH Ilmenau 1971.
1975	<i>Vasile Ifrim</i>	Beiträge zur dynamischen Analyse von Federantrieben und Mechanismen mit Hilfe von Übertragungsmatrizen. Diss. TH Ilmenau 1975.
1977	<i>Walter Lehmann</i>	Ein Beitrag zur Optimierung von Spiralfedern ohne Windungsabstand. Diss. TH Ilmenau 1977.
1979	<i>Hans-Jürgen Schorcht</i>	Beiträge zum Entwurf von Schraubfederantrieben. Diss. TH Ilmenau 1979.
1984	<i>Wilfried Tänzer</i>	Membranfedern als Bausteine für Federführungen. Diss. TH Ilmenau 1984.
1984	<i>Manfred Meissner Hans-Jürgen Schorcht Mathias Weiss</i>	Beitrag zur Automatisierung technologischer Prozesse der Gerätetechnik, dargestellt am Beispiel der automatischen Relaisjustierung. Diss. B TH Ilmenau 1984.
1985	<i>Uwe Schüller</i>	Untersuchungen zum Verformungsverhalten einseitig eingespannter Blatffedern. Diss. TH Ilmenau 1985.
1999	<i>Steffen Lutz</i>	Kennlinie und Eigenfrequenzen von Schraubendruckfedern. Diss. TU Ilmenau 1999.
2000	<i>Ulf Kletzgin</i>	Finite-Elemente-basiertes Entwurfssystem für Federn und Federanordnungen. Diss. TU Ilmenau 2000.
2002	<i>Kersten Liebermann</i>	Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für Schraubendruckfedern. Diss. TU Ilmenau 2002.
2005	<i>Veronika Geinitz</i>	Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern. Diss. TU Ilmenau 2005.
2005	<i>Tobias Wittkopp</i>	Mehrkörpersimulation von Schraubendruckfedern. Diss. TU Ilmenau 2005.

Seit 1998 werden gemeinsam mit der Eisendraht- und Stahldraht-Vereinigung (ESV) Projekte zur Federstahldrahtqualitätsverbesserung und –herstellung bearbeitet.

Ab 2004 werden auch tribotechnische Beanspruchungen an Federn untersucht, wozu eine Reihe tribotechnischer Untersuchungseinrichtungen angeschafft und aufgebaut wurden.

Die Entwicklung des Forschungslabors „Federn und Federntechnik“ an der TU Ilmenau zeigt nachfolgende historische Übersicht. Darüber hinaus wurde 2000 das Steinbeis-Transferzentrum für Federntechnik an der TU Ilmenau mit einem breiten Forschungs- und Dienstleistungsprofil eingerichtet.

Historischer Überblick [7.26]:

- 1961** Mit der Gründung des Instituts für Maschinenelemente an der Hochschule für Elektrotechnik in Ilmenau wurde in Abstimmung mit den Technischen Hochschulen der damaligen DDR dem Institut als Forschungsrichtung die Bearbeitung der Maschinenelementegruppe „Federn“ übertragen. Institutsleiter und Initiator war Doz. Dipl.-Ing. *Waldemar Euchler*.
- 1962** Durch Vermittlung der Arbeitsgruppe „Draht- und Drahterzeugnisse“ in Chemnitz (damals Karl-Marx-Stadt), in der das Institut vertreten war, erhielt das Institut fünf Forschungsthemen vom damaligen VEB Draht- und Federwerke Karl-Marx-Stadt übertragen (Themenbetreuer: Ing. *Klaus Wanke*). Dipl.-Ing. *Manfred Meissner*, Assistent am Institut für Maschinenelemente, wird als Forschungsgruppenleiter eingesetzt und mit dem Aufbau des Forschungslabors für Federn beauftragt.
- 1965** Aufbau eines Messplatzes zur Bestimmung der Eigenfrequenzen von Drähten (Bestimmung des G-Moduls) und von Schraubenfedern.
- 1966** Der Auftraggeber (Draht- und Federwerke Chemnitz) stellt Eigenbau-Prüfeinrichtungen für Dauerfestigkeitsuntersuchungen an Schraubendruckfedern und an Tellerfedern zur Verfügung. Weitere Schwingprüfeinrichtungen werden im Eigenbau errichtet.
- 1968/69** Bau und Inbetriebnahme einer selbst entwickelten Dauerschwingprüfeinrichtung für Schenkelfedern.
- 1969** Die Dauerschwinguntersuchungen an Schraubendruck-, Teller- und Schenkelfedern werden abgeschlossen. Auf Grund der Strukturveränderungen an der Technischen Hochschule Ilmenau wird das Federnlabor aufgelöst. Es werden nur noch im eingeschränkten Rahmen statische Federprüfungen durchgeführt, die zur Überprüfung

der entwickelten Berechnungsbeziehungen für Kontaktblattfeder-sätze dienten.

- 1970-77** Es werden Forschungsarbeiten zur Rationalisierung der Federberechnungen aller Federarten durchgeführt.
- 1978-83** Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme eines rechnergesteuerten Industrieautomaten für das Justieren der Federsätze von Kammrelais.
- 1984-90** Entwicklung von Federberechnungs- und -optimierungsprogrammen.
- 1985** Prof. Dr.-Ing. habil. *Hans-Jürgen Schorcht* übernimmt die Leitung des Fachgebietes Maschinenelemente.
- 1990-92** Aufbau der Fakultät für Maschinenbau, Strukturierung der Fachgebiete und Forschungsprofile.
- 1992** Beginn des Neuaufbaus des Federnlabors im Fachgebiet Maschinenelemente unterstützt durch den VDFI Hagen und das Land Thüringen (THMfKW, später TMWFK). Initiatoren: Dipl.-Ing. *Joa-chim Huhnen* (†) (s. **Bild 7.2**); Dr.-Ing. *Uwe Otzen* (†) und Dipl.-Ing. Betriebswirt (VWA) *Manfred Plitzko* sowie Dr. *Karl W. Maier* und Dr. *Georg Beduhn*
- 1992/93** Inbetriebnahme eines modernen Federwindeautomaten der Fa. WAFIOS. Arbeiten zum Windeprozess, Hard- und Software zur Automatensteuerung. Prof. Dr.-Ing. habil. *Mathias Weiß*, Leiter des Fachgebietes Rechneranwendungen im Maschinenbau, tritt mit seinem Fachgebiet der Forschungsgruppe bei und unterstützt die Forschungsarbeiten.
- 1993** Aufbau eines Schwingungsmessplatzes für Schraubenfedern (Hard- und Software). Untersuchungen des Eigenschwingungsverhaltens von Schraubenfedern (Längs-, Quer- und Drehschwingungen) und der Auswirkungen auf die Federdimensionierung.
- 1994** Entwicklung von Technologien zur Ausschussminimierung in der Schraubenfedernfertigung.



- 1995** Ableitung gestaltabhängiger Kennwerte zur Berechnung der Eigenfrequenzen von Schraubenfedern (Fortsetzung der 1993 begonnenen Arbeiten).
- 1996** Ab 1996 verschiedene Arbeiten zur Entwicklung von Berechnungssoftware zur Dimensionierung und Auswahl von Schraubenfedern (FedPro), für ein modulares CAD/FEM-System und ein offenes Entwurfssystem zur integrierten Gestaltung und Berechnung von Federanordnungen der Makro- und Mikrotechnik.
- 1997** Beginn zahlreicher Bearbeitungsthemen zu Technologien der Herstellung von Federstahldraht und Schraubenfedern
- mit höherem elastischen Formänderungsvermögen,
  - zur Weiterentwicklung der Qualität und Verarbeitbarkeit von Federdraht durch Kenntnis seines Umformverhaltens,
  - zu Einflüssen der End- und Übergangswindungen auf die Funktion, Fertigung und Betriebsverhalten von kaltgeformten Schraubendruckfedern,
  - zum Einfluss von Beschichtungen auf das Lauf- und Umformverhalten von Federstahldrähten auf Federwindeautomaten,
  - zur Optimierung des Festigkeits- und Umformverhaltens SiCr-legierter ölschlussvergüteter Federstahldrähte zwecks Verbesserung ihrer Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften u.
  - Ermittlung von funktions- und fertigungsrelevanten Federdrahtkennwerten,
- die gegenwärtig fortgeführt werden.
- 2000** Gründung des Seinbeis-Transferzentrums Federntechnik an der TU Ilmenau
- 2003/04** Beginn von Untersuchungen zur Auswirkung tribologischer Beanspruchungen auf die Funktion und Lebensdauer von Schraubendruckfedern (wird 2009 fortgesetzt).
- 2005** Prof. Dr.-Ing. *Ulf Kletzin* übernimmt die Leitung des Fachgebiets Maschinenelemente
- 2008** Geplante Forschungsprojekte:
- Optimierung des Vergütungsprozesses SiCr-legierter Federstahldrähte in Verbindung mit der Wärmebehandlung daraus zu fertigen hochbelastbarer Federn,

- Lebensdauervorhersage von Schraubendruckfedern,
- Untersuchung tribologischer Beanspruchungen von Schraubendruckfedern und
- Ermittlung funktions- und fertigungsrelevanter Kennwerte für Federstahldraht und Federband.



**Bild 7.2:** Erster Besuch von Dipl.-Ing. *Joachim Huhnen* (†) in Ilmenau am 3. September 1991 (v.l.: Dipl.-Ing. *Joachim Huhnen*, Dr.-Ing. habil. *Manfred Meissner* und Prof. Dr.-Ing. habil. *Hans-Jürgen Schorcht*)

Für die Bearbeitung der umfangreichen und vielgestaltigen Forschungsprojekte, die im Auftrage der Federn- und Halbzeugindustrie (Mitwirkung des Eisendraht- und Stahldraht-Vereinigung) bearbeitet wurden und künftig auch weiterhin bearbeitet werden sollen, stehen dem **Forschungslabor für Federn, Federntechnik und Draht** an der **TU Ilmenau** (Fachgebiete Maschinenelemente und Rechneranwendung im Maschinenbau), folgende Ausrüstungen an Prüf- und Messtechnik (Auswahl) zur Verfügung:

- Federwindeautomat,
- Universalprüfmaschine 10 kN (Zwick) und 50 kN (TIRAtest 2850),
- Dynamikprüfstände (servohydraulische Prüfmaschine, IABG-Schwinge, Bosch-Schwinge, Draht-Umlaufbiegeprüfstand),
- statische Biege- und Torsionsprüfstände,
- Eigenfrequenzmesstechnik,
- Bildverarbeitungsmessplatz und Hochgeschwindigkeitskamera und umfangreiche Rechentechnik,
- Pyrometer (100-500°C),
- Profilometer und Tribometer.

## 7.6 Zusammenfassung

Die deutsche Federnindustrie entwickelte sich im 19. Jahrhundert aus handwerklichen Fertigungsstätten der Metallver- und -bearbeitung sowie auch in einigen Metallerschmelzungsbetrieben, die meist Familienbetriebe waren und zum größten Teil auch heute noch sind. Aus dem Schmiedehandwerk entwickelten sich vor allem Betriebe, in denen Federn durch Warmformgebung hergestellt wurden. Federnbetriebe, die aus dem Schlosser-, Metallverarbeitungs- und Uhrenhandwerk hervorgingen, stellten vor allem kaltgeformte Federn her.

Die Entwicklung der Technik über Dampfmaschine, Eisenbahn- und Automobilbau führte in dieser Zeit u.a. zu einer großen Nachfrage an Federn, vor allem zunächst an geschichteten Blattfedern. Diese große Nachfrage war nur durch den Übergang von der handwerklichen zur industriellen Fertigung, die eine immer mehr zunehmende Automatisierung der Fertigung zu realisieren in der Lage war sowie durch die Entwicklung dafür geeigneter hochwertiger Federwerkstoffe, zu bewältigen.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts schlossen sich einige Betriebe der Stahl- und Federnfertigung zu Gemeinschaften zusammen, mit dem Ziel, einen ungesunden Wettbewerb zu vermeiden. Aus diesen Gemeinschaften ging schließlich im 20. Jahrhundert der Verband der Deutschen Federnindustrie (VDFI) hervor, der gegenwärtig über mehr als 100 Mitgliedsbetriebe vereinigt und im Jahr 2007 sein 125-jähriges Bestehen beging [7.12].

Mit der Zunahme der Federnproduktion Anfang des 20. Jahrhunderts wuchs auch der Bedarf an neuen Erkenntnissen zur wirtschaftlichen Fertigung der

verschiedensten Federarten und –formen, zur Höhe der ertragbaren Belastungen (Werkstoffbeanspruchbarkeit) und zur theoretischen Erfassung und Fundierung der Zusammenhänge *Federkraft – Federverformung – Federgestalt – Federabmessungen*. Neben betriebseigenen Prüflabors zur Sicherstellung der Qualität der gefertigten Federn, die meist in größeren Federfertigungsstätten eingerichtet wurden, fanden sich Institute, wissenschaftliche Einrichtungen und Einzelpersonlichkeiten, die eine Erforschung dieser Probleme unternahmen (s.a. Kapitel 5).

Gegenwärtig verfolgen Forschungsanstrengungen vor allem das Ziel, den Automatisierungsgrad der Fertigung von Federn zu erhöhen und die Qualität der Produkte zu sichern. Die Computertechnik unterstützt dabei neben Automatisierungsprozessen vor allem die Auslegung (Dimensionierung und Festigkeitsnachrechnung) der Federn und ihre funktionelle Überprüfung durch Simulationsprogramme.

## 8 Literatur und wichtige Patente

### 8.1 Literatur

#### Kapitel 1

- [1.1] Autorenkollektiv: Der kleine Brockhaus 1927.
- [1.2] *Baron, U.*: Henry Ford und die Automobilmachung der Gesellschaft. DIE WELT vom 16.07.2003.
- [1.3] Der kleine Brockhaus 1949.
- [1.4] Deutsches Museum: 75 Jahre Deutsches Museum. Offizielles Programm S. 103.
- [1.5] *Meissner, M.*: 150 Jahre Konstruktion und Berechnung von Metallfedern in Deutschland. VDI-Z. 150 (2008) Nr. 7/8, S. 12-14.
- [1.6] *Meissner, M.*: Die Anfänge der Federberechnungen. Festschrift zum Ehrenkolloquium von Prof. *G. Höhne* und Prof. *H.-J. Schorcht*. In Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau, Bd. 12, S. 15, Ilmenau: ISLE-Verlag 2005.

#### Kapitel 2

- [2.1] *Bach, C.*: Die Maschinenelemente, 10. Auflage. Stuttgart: Verlag der Cotta'schen Verlagsbuchhandlung 1908 (1. Auflage 1881).
- [2.2] *Bach, C.*: Elastizität und Festigkeit, 5. Auflage. Berlin: Springer-Verlag 1905 (1. Auflage 1889/90).
- [2.3] *Baumann, R.*: Wissenschaft, Geschäftsgeist und Hooke'sches Gesetz. VDI-Z. 61 (1917) 6, S. 117-124.
- [2.4] *Feldhaus, F. M.*: Die Geschichte der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker. Leipzig und Berlin: Verlag von Wilhelm Engelmann 1914.
- [2.5] *Grashof, F.*: Theorie der Elastizität und Festigkeit. Berlin: Verlag von Rudolph Gaertner 1866 (2. Auflage 1878).
- [2.6] Historical Facts About the Use of Springs (Historische Fakten über die Anwendung von Federn). Springs Magazine Bristol 13 (1974) 1, S. 9, 11, 12, 15, 16, 19 und 2, S. 17, 19, 21, 24, 27.
- [2.7] HÜTTE, des Ingenieurs Taschenbuch, 21. Auflage. Berlin: Verlag von Ernst & Sohn 1911 (1. Auflage 1856, 4. Auflage 1862).

- [2.8] Kleine Mitteilungen: Federwaage für 100t. VDI-Z. 72 (1928) 11, S.385.
- [2.9] Leonardo – Künstler, Forscher, Magier. Frankfurt/Main: S. Fischer Verlag GmbH 1974.
- [2.10] *Meissner, M.; Wanke, K.*: Handbuch Federn, 2. Auflage. Berlin/München: Verlag Technik GmbH 1993 (1. Auflage 1988).
- [2.11] *Meissner, M.; Wanke, K.*: Zur Geschichte der Federn. Draht 50 (1999) 6, S. 36-42.
- [2.12] Reibungsfeder RINGFEDER®. Firmenschrift der Ringfeder GmbH Krefeld 1993.
- [2.13] *Wanke, K.*: Entwicklungsgeschichte der Metallfedern. Metallverarbeitung 27 (1973) 3, S. 78-80.

### Kapitel 3

- [3.1] *Ammareller, Sepp*: Die Federstähle, ihre Entwicklung, Eigenschaften und Anwendungsgebiete. Stahl und Eisen, 72 (1952), Heft 9, S. 475-489.
- [3.2] *Ammareller, Sepp*: Stähle für warm geformte Blatt-, Schrauben- und Drehstabfedern. Stahl und Eisen, 84 (1964), Heft 15, S. 926-931.
- [3.3] *Arndt, Johannes*: Entwicklung einer werkstoff- und bauteilgerechten Technologie zur thermomechanischen Herstellung von Fahrzeugfedern. Freiburger Forschungshefte 1999, B296.
- [3.4] *Baumgartl, E., Resch, H. und Heinke, J.*: Zur Dauerfestigkeit vernickelter Druckfedern Draht 18 (1967) 8, S. 582- 591.
- [3.5] *Bleilöb, F. und Schücker, E.*: Die mechanischen Eigenschaften hartgezogener Federdrähte. Stahl und Eisen 277 (1957) 20, S. 1362- 1368.
- [3.6] *Brockhaus, J., Singer, H. und Felber, W.*: Zwischenstufenvergüteter Bandstahl, Eigenschaften und Verarbeitung DFBO-Mitt. 24 (1973) 3, S.38/42).
- [3.7] *Brühl, R.*: Die Anlasswirkung auf eine Matratzenstahldrahtfeder und ihre Bedeutung für die Federeinlagen- und Polstermöbelindustrie. Drahtwelt 47 (1961) 1 S.17-21 und 48 (1962) 3, S.99-100.
- [3.8] *Christian, H.*: Das röntgenografische Spannungsmessverfahren und seine Anwendung...HTM 26 (1971) 3, S. 180 – 198.
- [3.9] *Clausen, R. und Martin, P.*: Änderungen der Randzone kugelgestrahlter Proben ZWF 74(1974) H.7 S. 334- 340.

- [3.10] *Clausen, R. und Martin, P.*: Entwicklungsstand der Technologie des Kugelstrahlens ZWF 74 (1979) H.4, S.154-156 und H.5, S. 222-225.
- [3.11] Das Delta- Magni- Korrosionsschutz- System. Prospekt der Dörken AG Herdecke.
- [3.12] DE 4440 729 C2 *Heinke, J., Wanke, K. und Zehndner, O.*: Relaxationsfreie Stahlfeder/ Offengelegt: 30.5.1996).
- [3.13] Delta-Magni-Korrosionsschutz auf neuen Wegen. Draht 37 (1986) 1, S.19.
- [3.14] *Dengler, K.*: Der Draht und seine Museen. Draht 43 (1992) 3, S. 222.
- [3.15] *Dütemeyer, H.-J.*: Federn aus Kunststoff - eine Studie. Draht 34 (1983) 11, S. 548.
- [3.16] *Enard, E.*: Federn in der Feinwerktechnik und ihre Werkstoffe. Zeitschrift für Werkstofftechnik 3 (1972) 7, S. 345.
- [3.17] *Engelmohr, F., Fiedler, B.*: Festigkeitsstrahlen unter Vorspannung. DVM-Betriebsbericht „Moderne Fertigungstechnologien“ 1991, S.77-91.
- [3.18] *Fabry, Ch. W.*: Kugelstrahlen- Theorie, Praxis, Versuch. Konstruktion 17 (1965) S.141 153.
- [3.19] Federfibel der Scherdel GmbH, aktuelle Ausgabe.
- [3.20] *Feldhaus, F. M.*: Die Geschichte der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker. Leipzig und Berlin: Verlag von Wilhelm Engelmann 1914.
- [3.21] *Fischer, Friedhelm*: Leistungssteigerung von Schraubendruckfedern für PKW-Achsen, Hoesch Federn GmbH, IAA 1995.
- [3.22] *Föppl, O.*: Oberflächendrücken zum Zwecke der Steigerung der Dauerhaltbarkeit mit Hilfe des Stahlkugelgebläses. Die Werkzeugmaschine 43 (1939) H.8, S. 167-169 und 44 (1940) H.6, S. 123- 128.
- [3.23] *Föppl, O.*: Oberflächenverdichtung von Maschinenteilen, Stahl und Eisen 49 (1929).
- [3.24] *Föppl, O.*: Statische Eichung und Setzgefahr von Verdrehungsstäben. Werkstatt und Betrieb 79 (1946) 9, S. 205-208.
- [3.25] *Fritsch, G. und Härting, M.*: Zerstörungsfreie Spannungsmessung mit Tiefenauflösung. Konferenz der ESF in Düsseldorf am 4.4.1990.
- [3.26] *Gesell, W.*: 35 Jahre Kugelstrahlen. Draht 15 (1964) 8, S. 550 – 556.
- [3.27] *Göbel, E. F.*: Berechnung und Gestaltung von Gummifedern, 3. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1969.

- [3.28] *Göbel, E. F.*: Gummi und seine Anwendung in der Feinwerktechnik. Feinwerktechnik 66 (1962) 8, S. 291 - 301.
- [3.29] *Groß, Siegfried; Lehr, Ernst*: Die Federn, Ihre Gestaltung und Berechnung. Berlin: VDI-Verlag 1938.
- [3.30] *Hamann, C.*: Die Entwicklung der Drahtwebmaschine und der heutige Stand der Drahtweb-Technik. Draht 43 (1992) 3, S. 331 - 333.
- [3.31] *Hauk, V.*: Der gegenwärtige Stand der röntgenografischen Ermittlung von Spannungen. Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 38 (1967) 3, S. 233- 240.
- [3.32] *Hauk, V.*: Ermittlung von Eigenspannungen aus röntgenografischen Gitterkonstanten- Messungen. Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 25 (1954) 5/6, S. 273- 278.
- [3.33] *Hensger, K. E.*: Hochtemperaturthermomechanische Behandlung von Federstahl. Neue Hütte 22 (1977) 12, S. 673- 674.
- [3.34] Historical Facts About the Use of Springs (Historische Fakten über die Anwendung von Federn). Springs Magazine Bristol 13 (1974) 1, S. 9, 11, 12, 15, 16, 19 und 2, S. 17, 19, 21, 24, 27.
- [3.35] Hoesch AG: Unser Fabrikationsprogramm, 1961. Walzwerke Hohenlimburg, Betrieb Federnwerk.
- [3.36] Hoesch AG: Unser Fabrikationsprogramm, 1967. Walzwerke Hohenlimburg.
- [3.37] *Houdremont, Eduard; Bennek, Hubert*: Federstähle. Stahl und Eisen, 52 (1932), Heft 27, S. 653-662.
- [3.38] *Huhnen, J.*: Entwicklungen auf dem Federgebiet. Draht 17 (1966) 9, S. 669- 681 und 18 (1967) 8, S.592- 612.
- [3.39] *Huhnen, J.*: Schraubenzugfedern. Draht 38 (1987) 2, S. 109 - 111.
- [3.40] *Klis, T. v. d.*: Wasserstoffsprädigkeit. Galvanotechnik 52 (1961) 1, S.2 -13.
- [3.41] *Kopp, H.*: Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Texturfederbandstähle. Draht 40 (1989) 2, S. 127/130...).
- [3.42] *Kötzschke, P.*: Neuere Erkenntnisse über die Herstellung und Prüfung von hochwertigen Drähten unter besonderer Berücksichtigung von Ventulfederdraht. Jahrbuch der Deutschen Luftfahrtforschung 1938 II, S.319-325.
- [3.43] Kataloge und Broschüren des Deutschen Drahtmuseums in Altena und *Düttmann M.; Senden, St.*: Draht, vom Kettenhemd zum Supraleiter. Iserlohn: Mönning Verlag 2001.
- [3.44] *Kreutzer, A.*: Warmsetzen von Schraubendruckfedern. Draht 35 (1984) 7/8, S.386-389.



- [3.45] *Macherauch, E. und Müller, P.*: Das  $\sin^2\psi$  –Verfahren der röntgenografischen Spannungsmessung. Z. f. angew. Physik 13 (1961) 7, S. 305- 312.
- [3.46] Maschinen für die Drahtverarbeitung - 100 Jahre WAFIOS. Reutlingen: Wafios Maschinenfabrik 1993.
- [3.47] *Meissner, M.; Schorcht, H.-J.*: Metallfedern. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1997und 2007.
- [3.48] *Meissner, M.; Wanke, K.*: Zur Geschichte der Federn. Draht 50 (1999) 6, S. 36 – 42.
- [3.49] *Muhr, K. H., Niepage, P. und Willmacher, H.*: Relaxation von Tellerfedern, Konstruktion 27 (1975) H.12, S. –471.
- [3.50] *Muhr, K. H.*: Einfluss von Eigenspannungen auf das Dauerschwingverhalten von Federn aus Stahl. Stahl und Eisen 90 (1970) 12, S. 631-636.
- [3.51] *Müller, E.*: Plastizieren, Kugel- und insbesondere Strahlenspannungen zur Lebensdauersteigerung von Federelementen. Berichte des DVM-Tages 1994, S.339 ff. Deutscher Verband für Materialforschung und –prüfung e.V. Berlin1994.
- [3.52] *Müller, E.*: Spannungsstrahlen von Schraubendruckfedern. Draht 1944 (1993) 1/2, S.49-55.
- [3.53] *Münzner, D.; Ulbricht, J.*: Einflüsse auf das Kriechen und die Relaxation warmgeformter Schraubendruckfedern. ATZ 74 (1972) 10, S.406-409.
- [3.54] *Nenninger, M.*: Draht im Altertum. Draht 43 (1992) 3, S. 219 - 221.
- [3.55] Oberflächenverfestigung- Kugelstrahlen-Shot Peening. Draht 32 (1981) 8, S. 458-464.
- [3.56] *Otzen, U.*: Über das Setzen von Schraubenfedern. Dissertation TU Stuttgart 1955.
- [3.57] *Peiter, A.*: Eigenspannungen I. Art. Düsseldorf: Michael Triltsch Verlag 1966.
- [3.58] *Peters, Andreas*: Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Mikrolegierung und thermomechanische Behandlung. Dissertation 1996, RWTH Aachen.
- [3.59] *Pomp, A. und M. Hempel*: Mitteilung des Max-Planck-Institutes Nr.516. Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 21 (1950) H.7/8, S.243-262.
- [3.60] *Pomp, A.*: Bericht über einen Vortrag von *S. H. Rees* zur Tagung von Iron and Steel 1933 in Sheffield. Stahl und Eisen 53 (1933) 51, S.1341-1342.

- [3.61] *Püngel, W.*: Der Einfluss der Nachbehandlung auf die Eigenschaften von Stahldraht. Stahl und Eisen 62 (1941) 41, S. 853-858 und 42, S. 876- 879.
- [3.62] *Püngel, W.*: Einfluss der Nachbehandlung auf die elastischen Eigenschaften von Stahldraht. Stahl und Eisen 76 (1956) 25, S.1685-1689.
- [3.63] *Schilling-Praetzel, M.*: Einfluss der Werkstücktemperatur beim Kugelstrahlen auf die Schwingfestigkeit von Drehstabfedern. Diss. RWTH Aachen 1995.
- [3.64] *Schlemperer, O.*: Verfahren zur Erhöhung der Schwingungszahl von Federn DRP 573630 vom 27.5.1929 (Stahlwerke Röchling Völklingen/Saar).
- [3.65] *Schorcht, H.-J.; Meissner, M.; Wauro, F.*: Federn in mikromechanischen Strukturen. Draht 44 (1993) 4, S. 207 - 217.
- [3.66] *Schremmer, G.*: Eigenspannungen aus dem Setzvorgang bei Drehstabfedern und deren Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Draht 18 (1967) 6, S. 373-376 und 9, S. 721-733.
- [3.67] *Schwier, F.*: Beitrag zur Frage der mechanischen Alterung bei hartgezogenen, patentierten Stahldrähten. Stahl und Eisen 72 (1952) S.58-66.
- [3.68] *Siebel, E. und Panknin, W.*: Beitrag zur Normung der Federstahldrähte. Stahl und Eisen 72 (1952) 20, S.1193-1195.
- [3.69] Stahldrahterzeugnisse. Düsseldorf: Verlag Stahleisen m. b. H. 1956. Druckschrift-Nr. 001, Ausgabe November 1965.
- [3.70] *Straub, J., May, D.*: Spannungskugelstrahlen. The Iron Age 1949 H.4, S. 66-70
- [3.71] *Stumpp, F.*: Untersuchungen an Federdrähten und Ventilfedern. Draht 4 (1953) 1, S.27-34.
- [3.72] *Walz, K. H.*: Einfluss der Zwischenstufenvergütung auf die Lebensdauer einer Schraubendruckfeder. Draht 2 (1951) 1, S.14-17.
- [3.73] *Walz, K. H.*: Federfragen. Bericht der Mauserwerke 1943.
- [3.74] *Walz, K. H.*: Korrosionsprobleme bei Tellerfedern. CB- Grünheft.
- [3.75] *Wanke, K.*: Entwicklungsgeschichte der Metallfedern. Metallverarbeitung 27 (1973) 3, S. 78 - 80.
- [3.76] *Wanke, K.*: Korrosionsschutz von Federn. Draht 15 (1964) 3, S. 103- 113.
- [3.77] *Wick, A.; Schulze, V.; und Vöhringer, O.*: Kugelstrahlen bei erhöhter Temperatur mit einer Druckluftstrahlanlage. Mat.-Wissenschaft und Werkstofftechnik 30 (1999) S.269- 273.
- [3.78] *Zeller, R.*: Kugelstrahlen unter Vorspannung. Materialprüfung 35(1993)S.218-221

- [3.79] *Zouhar, G. jun. und Mitarb.*: Gleichzeitige Festigkeits-, Duktilitäts- und Bruchzähigkeitssteigerung von niedriglegierten Stählen durch HTMB. *Neue Hütte* 21 (1976) 8, S.463- 467.
- [3.80] Leonardo – Künstler, Forscher, Magier. Frankfurt/Main: S. Fischer Verlag GmbH 1974.
- [3.81] Zeitschrift DRAHT 2 (1951) 3 „ALTENA, die Stadt der Drahtindustrie“ mit Beiträgen von *Ferdinand Schmidt*, S. 54-58; *H. W. Lewalter*, S. 59-62; *Werner Hesse*, S. 63-67; *Karl-Heinz Schimz*, S. 70-71; *Günther Jackwirth*, S. 71-73; *K. W. Michler*, S. 73-78 und *H. Kalpers*, S. 79.

## Kapitel 4

- [4.1] - : Persönliche mündliche Mitteilung von *Helmut Seck* (Hagen-Hohenlimburg).
- [4.2] - : Persönliche mündliche Mitteilungen von *Helmut Schulte* (Ennepetal) und *Helmut Seck* (Hagen-Hohenlimburg).
- [4.3] 100 Jahre KERN-LIEBERS. Schramberg: Festschrift der H. Kern und Liebers GmbH & Co., Platinen- und Federnfabrik, Privatdruck 1988.
- [4.4] 100 Jahre SCHERDEL Technische Federn. Marktredwitz: Festschrift der Technische Federn Sigmund Scherdel GmbH Marktredwitz, Firmenschrift/Privatdruck 1990.
- [4.5] 1920 von Magdeburg nach Sonthofen 1970 - 50 Jahre Dr. Werner Röhrs KG. Sonthofen: Festschrift der Firma Dr. Werner Röhrs KG, Fabrik für Stahlverformung Sonthofen/Allgäu. Firmenschrift/Privatdruck 1970.
- [4.6] 25 Jahre Finzer- Stanzbiege- sowie Kombinations- und Montagetechnik. *Draht* 37 (1986) 9, S. 510- 512.
- [4.7] *Aden, Alfred, etc.*: Das Fahrerlebnis Porsche Cayenne. Extra-Sonderheft ATZ u. MTZ, Juli 2003, S. 114-125.
- [4.8] *Almen, I. O.; Laszlo, A.*: The Uniform-section Disk Spring. *Trans. ASME* 58 (1936), S. 305 – 314.
- [4.9] *Bernstein, A.*: Post und Eisenbahn; Die Schnellpost in Westdeutsches Heimatbuch, 1926 (Herausgeber Reinhard Lüster, Weidenau/Sieg).
- [4.10] *Birkmann, H.*: WAFIOS- neue Generation CNC- gesteuertes Federwindemaschinen. *Draht* 37 (1986) 6, S. 341-343.

- [4.11] *Bleilöb, F.; Born, H.*: Die Dauerfestigkeit von Federn aus ölvergüteten und patentiert hartgezogenen Federdrähten. Stahl und Eisen 83 (1963) 25, S. 1605-1616.
- [4.12] *Blum, T.*: Federn und Drahtbiegeteile als Multi- Funktionselemente, Draht 47 (1996) 10, S. 496-499 und 47 (1996) 11/12, S. 544-546.
- [4.13] *Blum, T.*: Von der Mechanik zur Elektronik. Draht 50 (1999) 6, S. 44-47.
- [4.14] *Blum, T.; Sauter, D.; Tröster, T.*: Die Entwicklung der Druckfeder-Windemaschine – Gestern und Heute. DRAHT 44 (1993) 9, S. 505-515.
- [4.15] *Bussien, Richard*: Automobiltechnisches Handbuch, 13. Auflage, Ergänzungsband, 1935.
- [4.16] CB-Handbuch Tellerfedern. Firmenschrift der Christian Bauer GmbH+Co. Welzheim/ Württ. 1991.
- [4.17] *Clark, H. H.*: Stranded Wire Helical Springs (Spiralfedern aus verseiltem Draht). In: *Chironis, N. P.*: Spring Design and Application. New York/Toronto/London: McGraw-Hill Book Comp. 1961, S. 92-96.
- [4.18] CNC- gesteuerte Federwindautomaten oder nicht (Simplex- Rapid bezieht Stellung.) Draht 37 (1986) 4, S. 239.
- [4.19] *Estorff, Hans-Eckart v.*: Einheits-Parabelfedern für Kraftfahrzeug-Anhänger. Brüninghaus aktuell, September 1973.
- [4.20] *Estorff, Hans-Eckart v.*: Neuzeitliche Blattfedern für Kraftfahrzeuge. Vortrag an der Technischen Akademie Wuppertal am 11.03.1969.
- [4.21] Federfibel der Scherdel KG Marktredwitz.
- [4.22] *Fischer, Friedhelm*: Progressiv wirkende Tonnenfedern als Tragfedern im Kraftfahrzeug. Hoesch Hohenlimburg AG, IAA 1983.
- [4.23] *Forster, E. E.*: US-Patent 2609191
- [4.24] *Frei, M.*: Kostengerechter Einsatz von Produktionsmaschinen in der Federindustrie. DRAHT 44 (1993) 6, S. 369-372.
- [4.25] Fried. Krupp AG: Krupp – Neuzeitliche Fahrzeugfederung. Broschüre VZ 3497 (Ausgabe September 1934).
- [4.26] *Gesell, W.*: 35 Jahre Kugelstrahlen. Draht 15 (1964), Nr. 8, S. 550-556.
- [4.27] Gewickelte Schraubentellerfeder. Dr. Werner Röhrs KG, Sonthofen/Allgäu: Firmenprospekte 1993.
- [4.28] *Gimborn, H.-S. v.*: Sondermeßsysteme für Schraubenfeder-Prüfmaschinen. Draht 42 (1991) 3, S. 158 – 164.

- [4.29] *Göhner, O.*: Schubspannungsverteilung im Querschnitt einer Schraubenfeder. Ing. Archiv 1 (1930), S. 619 und (1931), S. 381.
- [4.30] *Grammel, R.*: Die Knickung von Schraubenfedern. Z. f. angew. Math. u. Mech. Bd. 4 (1924), S. 384.
- [4.31] *Grieb, E.*: Eigenschaften der Federwerkstoffe und höchstzulässige Beanspruchungen für Federn. Stahl und Eisen 3.5.1934, S. 449-450.
- [4.32] *Gross, S.*: Zur Berechnung der Spiralfeder. Draht 11 (1960) 8, S. 455-458.
- [4.33] *Gross, S.*: Zylindrische Schraubendruckfedern mit ungleichförmiger Steigung. Draht 10 (1959) 8, S. 358-365.
- [4.34] H.Dv. 471; M.Dv.Nr.239; L.Dv. 100: Handbuch für Kraftfahrer, 8. Auflage. Berlin: E.S. Mittler & Sohn 1939.
- [4.35] Hoesch AG Hohenlimburg: Warmgeformte Federn, 2. Ausgabe 1987.
- [4.36] Hoesch AG, Walzwerke Hohenlimburg, Betrieb Federnwerk: Unser Fabrikationsprogramm 1961.
- [4.37] Hoesch AG, Walzwerke Hohenlimburg: Unser Fabrikationsprogramm, 1967.
- [4.38] Hohenlimburger Walzwerke AG: Dauer-Schmiersystem „HOESCH“ für Blattfedern. Broschüre Oktober 1952.
- [4.39] *Huhnen, J.*: Ein Beitrag zur Dauerprüfung von Schraubenfedern. Draht 17 (1966) 6, S. 357 ff.
- [4.40] *Huhnen, J.*: Schraubenzugfedern – von Hooke bis etwa 1960. Draht 38 (1987) 2, S. 109- 112.
- [4.41] *Huhnen, J.*: Schraubenzugfedern mit extremen inneren Spannungen. Draht 28 (1977) 11, S. 517- 522.
- [4.42] *Hurlbrink, E.*: Berechnung zylindrischer Druckfedern auf Sicherheit gegen seitliches Ausknicken. VDI-Z. 54 (1910) 4, S. 133-137 und 5, S. 181.
- [4.43] *Hußmann, A.*: Schwingungen in schraubenförmigen Ventildedern . Jahrbuch der Deutschen Luftfahrtforschung 1938 II., S. 119-133.
- [4.44] *Iten, P., Müller, L.*: Die Schlingfeder als mechanisches Servoelement. SMM 1996 Nr.20, S. 20-25 (Fa. Baumann & Cie).
- [4.45] *Jaeschke, A.*: Die zylindrische Druckfeder. Drahtwelt 44 (1958) H. 23/24, S. 425-428.
- [4.46] *Jahnke, J.*: Spiral-, Trieb- und Rollfedern aus Bandstahl. Esslingen: Technische Akademie, Lehrgang: Kaltgeformte Federn 2002 und 2004.

- [4.47] *Jante, Alfred*: Der neue Citroën DS 19. Kraftfahrzeugtechnik 1956, Heft 2, S. 47-49.
- [4.48] *Jante, Alfred*: Grundsätzliche Möglichkeiten der Luftfederung. Kraftfahrzeugtechnik 1956, Heft 2, S. 44-47 und Heft 5, S. 165.
- [4.49] Jonas Woodhead & Sons: Woddhead's Laminated Springs. Broschüre März 1932.
- [4.50] Katalog der Firma Gutekunst + Co Metzingen.
- [4.51] Katalog der Firma Knörzer.
- [4.52] *Keitel, H.*: Die Rollfeder, ein federndes Maschinenelement mit horizontaler Kennlinie. Draht 15 (1964) 8, S. 534-538.
- [4.53] *Kloos, K. H.; Macherauch, E.*: Development of Mechanical Surface Strengthening Processes from the Beginning until Today Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference of Shot Peening 1987. Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel 1987, 3-27.
- [4.54] *Konik, Dieter u. a.*: Dynamic Drive – das neue aktive Wankstabilisierungssystem der BMW Group. Aachener Kolloquium Fahrzeug- u. Motorentechnik 2000.
- [4.55] *Kreissig, E.*: Biegungs-, Zug- und Druckfedern in bezug auf die Fahrzeugfederung. Glasers Ann. 95 (1924), S. 114 und DP 358 328 Ringfeder.
- [4.56] *Lehmann, W.*: Ein Beitrag zur Optimierung von Spiralfedern ohne Windungsabstand. Diss. TH Ilmenau 1977.
- [4.57] *Lehr, E.*: Die Wechselfestigkeit des Ventildfederdrahtes. VDI-Z. 77 (1933) 24, S. 648-649.
- [4.58] *Lehr, E.*: Schwingungen in Ventildfedern. VDI-Z. 77 (1933) 18, S. 457- 462.
- [4.59] *Liessecke, G.*: Berechnung zylindrischer Schraubenfedern mit rechteckigem Drahtquerschnitt. VDI-Z. 77 (1933) 16, S. 425-426 und S. 892.
- [4.60] *Manteuffel, R. Z. v.*: Dauerhaltbarkeit von Kraftfahrzeugfedern. Deutsche Kraftfahrtforschung Heft 49 VDI-Verlag GmbH Berlin 19 47.
- [4.61] *Marquard, E.*: Schwingungsdynamik des schnellen Straßenfahrzeugs. Essen: Verlag W. Girardet 1952.
- [4.62] Maschinen für die Drahtverarbeitung - 100 Jahre WAFIOS. Reutlingen: Wafios Maschinenfabrik 1993.
- [4.63] *Meissner, M.; Wanke, K.*: Handbuch Federn, 2. Auflage. Berlin/München: Verlag Technik GmbH 1993.

- [4.64] *Merkel, E.:* Die Berechnung von Schraubendruckfedern, gewickelt aus Drahtlitzten. Berichte aus Theorie und Praxis des Instituts für Wälzlager und Normteile Karl-Marx-Stadt 4 (1961) Heft 4.
- [4.65] *Merkel, P.:* Allgäuer Spezialitäten. Industrie Anzeiger 15 (1994), S. 84-85.
- [4.66] Mitteilungen: Reibungsfeder für Güterwagen. VDI-Z. 72 (1928) 21, S. 694.
- [4.67] MUBEА-Tellerfedern-Handbuch. Firmenschrift der Fa. Muhr und Bender Attendorn 1987.
- [4.68] *Muhr, T.:* Zur Konstruktion von Ventildedern in hochbeanspruchten Verbrennungsmotoren. Diss. RWTH Aachen 1992/1993.
- [4.69] *Münzinger, Jochen:* Der elektrisch zu- und abschaltbare Hinterachsstabilisator des Nissan Patrol GR – eine Systembeschreibung. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Februar 1999, Heft 2.
- [4.70] *Niepage, P.:* Zur rechnerischen Abschätzung der Lastspannungen in angebogenen Schraubenzugfederösen. Draht 28 (1977) 1, S. 9-14 und 3, S. 101-108.
- [4.71] *Paudert, H.:* Federn aus Bandstahl. Draht 19 (1968) 4, S. 240-247.
- [4.72] *Pomp, A.; Hempel, M.:* Dauerfestigkeit von Schraubenfedern unterschiedlicher Fertigungsart. Archiv. f. d. Eisenhüttenwesen 21 (1950) 7/8, S. 243-272.
- [4.73] Reibungsfeder RINGFEDER®. Firmenschrift der Ringfeder GmbH Krefeld 1993.
- [4.74] Richard Berry & Son: Leaf-Spring Manufacture. Reprinted from Automobile Engineer, April 1959.
- [4.75] *Robinson, Geoff:* Taperlite suspension springs for road vehicles Special Steels Nr. 4, summer 1974, pages 23-27.
- [4.76] *Röhrs, W.:* Dynamische Prüfung von stoßartig hochbeschleunigten Schraubendruckfedern und Maschinenteilen. KEM (1973) Sept. S.103- 107 und Okt. S. 92-99.
- [4.77] *Röhrs, W.:* Patentschrift 767478: Auf Drehung beanspruchte Stabfeder. Patentierte im Deutschen Reich vom 3. Juni 1939; Nachdruck: Deutsches Patentamt München 1952.
- [4.78] *Röhrs, W.:* Patentschrift 2115314: Mit Elastomeren beschichtete Mehrdrahtfedern. Deutsches Patentamt München 1972.
- [4.79] *Röhrs, W.:* Offenlegungsschrift 2531704: Mehrdrahtfedern (Litzfedern). Deutsches Patentamt München 1977.
- [4.80] *Röver, A.:* Beanspruchung zylindrischer Schraubenfedern mit Kreisquerschnitt. VDI-Z. 57 (1913) 48, S. 1906-1911.
- [4.81] Rundschau: Eisenbahnwesen. VDI-Z. 69 (1925) 52, S. 1644/45.

- [4.82] *Sachs, G.*: Mit Tellerfedern groß geworden. Draht 34 (1983) 10, S. 516-517.
- [4.83] *Sack, W.*: Prüfung der Planparallelität von Schraubendruckfedern. Draht 37 (1986) 6, S.339 – 340.
- [4.84] *Sander, W.*: Uhrenlehre (Reprint der Originalausgabe von 1925). Stuttgart: Rühle-Diebener-Verlag, Reprint 1985.
- [4.85] *Sanders, T. H.*: Springs: A Miscellany (2 Bände). The Locomotive Publishing Co. Ltd., London 1940.
- [4.86] *Smeets, Robert*: Übertragung der theoretischen Ergebnisse in verfahrenstechnische Anlagen für die industrielle Serienproduktion von Parabelfedern. Vortrag im Seminar „Fahrzeugfedern“, TA Esslingen 2003.
- [4.87] *Straub, J., May, D.*: Spannungskugelstrahlen. The Iron Age (1949), Nr. 4, S. 66-70.
- [4.88] *Swieskowski, H. P.*: Establishing Fabricating Methods for Two- and Three-Wire Mesh Springs. Springs 2001, Heft 6, S. 83-85.
- [4.89] *Tarr, László*: Karren, Kutsche Karosse; Eine Geschichte des Wagens. Berlin: Henschel Verlag 1978.
- [4.90] TGL 19396 und 19397 Ausgabe Juni 1977.
- [4.91] *Ulbricht, Joachim*: Progressive Schraubendruckfeder mit veränderlichem Drahtdurchmesser für den Fahrzeugbau. ATZ 1969, Heft 6, S. 198-201.
- [4.92] VDFI: Einsatzmöglichkeiten und Einsatzwahrscheinlichkeit von faserverstärkten Kunststofffedern im Fahrzeugbau (Harbridge House Europe, Oktober 1981).
- [4.93] Vereinigte Motor-Verlage: mot-Spezial; Alles über das Fahrwerk, SH 04/91 001.
- [4.94] *Walz, K.*: Die Litzefeder. Draht 2 (1951) 5, S. 129-135.
- [4.95] *Walz, K.*: Federnfragen. Sonderdruck der Mauserwerke Oberndorf. Stuttgart: Buchdruckerei Gebrüder Knöllner 1943.
- [4.96] *Walz, K.*: Entwurf und Konstruktion der Tellerfeder. Werkstatt und Betrieb 90 (1957), S. 311 – 316.
- [4.97] *Walz, K.*: Über 25 Jahre Bihler- Technik. Draht 30 (1979) 6, S. 369- 374.
- [4.98] *Walz, U. G.*: Aktive Federung. Esslingen: Lehrgang „Federungs- und Dämpfungssysteme“ an der Technischen Akademie Esslingen am 14.10.1998.
- [4.99] Warum Schenker (noch) keine CNC- Federwindeautomaten baut. Draht 37 (1986) 4, S. 237238.
- [4.100] *Wende, Hans*: Beitrag zur Entwicklung der Luftfeder im Omnibus. ATZ 1964, Heft 10, S. 284-287.



- [4.101] *Wernitz, W.*: Die Tellerfeder. *Konstruktion* 6 (1954) 10, S. 361-376.
- [4.102] *Wienand, Josef*: Faserverstärkter Kunststoff – eine Alternative für Stahl bei Blattfedern? *Krupp-Zeitschrift „Sie und wir“* 1987, Nr. 1, S. 68-71.
- [4.103] *Wienand, Josef*: Neue Werkstoffe und Fertigungstechnologien für höher beanspruchte Fahrzeugtragfedern *Zeitschrift „Stahl Formen – Fügen – Fertigen“*, 1998, Heft 4, S. 49ff.
- [4.104] *Winsen, F. H. van*: Der „Große Mercedes“ Typ 600. *ATZ* 1963, Heft 9, S. 256-263.
- [4.105] *Wolf, W. A.*: Vereinfachte Formeln zur Berechnung zylindrischer Schraubenfedern mit Rechteckquerschnitt. *VDI-Z.* 91 (1949), S. 259.
- [4.106] *Wolff, A.*: Zu Schraubenfedern mit Ösen. *Maschinenbau-Betrieb* Band 6 (1927) 8, S. 417-418.
- [4.107] *Wulfmeyer, H.*: 100%ige Produktprüfung bei der Teilefertigung. *Draht* 34 (1983) 4.
- [4.108] *Wulfmeyer, H.*: Das “Dynamische Messen” - ein entscheidender Fortschritt in der Prüftechnik. *Draht* 135 (1984) 5, S. 284 ff.
- [4.109] *Zimmerli, F. P.*: Shot Blasting, its Effect on Fatigue Life. *American Society of Metals*, 1944, S. 261-278.
- [4.110] *Grimsehl*: Lehrbuch der Physik.
- [4.111] <http://www.freunde-alter-wetterinstrumente.de> (Beitrag von G. Stöhr 2004.6)
- [4.112] <http://www.roehrs.de> (Firmenprofil der W. Röhrs KG, Sonthofen/Allgäu)

## Kapitel 5

- [5.1] *Almen, I. O.; Laszlo, A.*: The Uniform-section Disk Spring. *Trans. ASME* 58 (1936), S. 305 – 314.
- [5.2] Associated Spring Corporation: Springs – a Bibliography. Bristol: Connecticut, September 1952.
- [5.3] *Bach, C.*: Die Maschinenelemente, 10. Auflage. Stuttgart 1908.
- [5.4] *Bach, C.*: Die Materialprüfungsanstalt der Königl. Technischen Hochschule Stuttgart. *VDI-Z.* 52 (1908) 7, S.241 – 243.
- [5.5] *Bach, C.*: Elastizität und Festigkeit, 5. Auflage. Berlin 1905.
- [5.6] *Bach, C.*: Mitteilung zur Gültigkeit der Saint-Venant’schen Formeln für den Verdrehungswinkel. *VDI-Z.* 49 (1905), S. 960 – 961.

- [5.7] *Bach, C.*: Ventile für Kolbenpumpen mit großer Hubzahl. VDI-Z. 25 (1881), S. 138.
- [5.8] *Bach, C.*: Zum Begriff „Streckgrenze“. VDI-Z. 48 (1904) 28, S. 1040 – 1043.
- [5.9] *Bach, C.*: Zur Gesetzmäßigkeit der elastischen Dehnungen. VDI-Z. 46 (1902) 1, S. 25-26.
- [5.10] *Banse, G. u. a.*: Biographien bedeutender Techniker, Ingenieure und Technikwissenschaftler. Berlin: Volk und Wissen 1987.
- [5.11] *Baumann, R.*: Wissenschaft, Geschäftsgeist und Hookesches Gesetz. VDI-Z. 61 (1917) 6, S. 117-124.
- [5.12] *Bergsträsser, M.*: Die Berechnung zylindrischer Schraubenfedern. VDI-Z. 77 (1933), S. 198.
- [5.13] *Bernal, J. D.*: Die Wissenschaft in der Geschichte. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften 1967.
- [5.14] *Branowski, B.*: Wahl der optimalen Konstruktionsparameter von Schraubendruckfedern unter Berücksichtigung der minimalen Kosten oder Baumassen. Draht 31 (1980) 2, S. 67 – 69 (Teil I) und 32 (1981) 6, S. 303 – 305 (Teil II).
- [5.15] *Buchheim, G., Sonnemann, R.*: Geschichte der Technikwissenschaften. Basel/Boston/ Berlin: Birkhäuser Verlag 1990.
- [5.16] *Castigliano, C. A.*: Theorie der Biegungs- und Torsions-Federn (Übersetzung aus dem Italienischen von R. Totz). Wien: Verlag von C. Gerold u. Sohn 1888.
- [5.17] CB-Handbuch Tellerfedern. Firmenschrift der Christian Bauer GmbH&Co. Welzheim/ Württ. 1991.
- [5.18] *Curti, G.; Orlando, M.*: Ein neues Berechnungsverfahren für Tellerfedern. Draht 30 (1979) 1, S. 17 – 22.
- [5.19] *Curti, G.; Orlando, M.; Podda, G.*: Experimentelle Nachprüfung eines neuen Berechnungsverfahrens für Tellerfedern. Draht 31 (1980) 1, S. 26 – 29.
- [5.20] *Feldhaus, F. M.*: Die Geschichte der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker. Leipzig und Berlin: Verlag von Wilhelm Engelmann 1914.
- [5.21] Firmenschrift Baumann + Cie AG Federnfabrik Rütli (Schweiz).
- [5.22] Firmenschrift der Technische Federn Sigmund Scherdel KG, Marktredwitz.
- [5.23] Firmenschrift Gutekunst & Co. Federnfabrik Metzingen.
- [5.24] *Fischer, V.*: Logarithmisch-zeichnerische Tafel zur Federermittlung. VDI-Z. Bd. 53 (1909), S. 1075.

- [5.25] *Föppl, A.*: Vorlesungen über Technische Mechanik, 3. Band: Festigkeitslehre, 6. Auflage. Leipzig/Berlin: Teubner Verlag 1918.
- [5.26] *Föppl, A.; Föppl, L.*: Drang und Zwang. München/Berlin: Verlag Oldenbourg 1920; 3. Auflage 1941.
- [5.27] *Friedrichs, J.*: Die Uerdinger Ringfeder<sup>®</sup>. Draht 15 (1964), S. 539 – 542.
- [5.28] *Fröhlich, P.*: Dynamische Vorgänge in zylindrischen Schraubenfedern mit besonderer Berücksichtigung der Massendruck-Kompensatoren. Zeitschrift Math. u. Physik 56 (1908), S. 379 – 413.
- [5.29] *Geinitz, V.*: Umformverhalten von Federdraht. Draht 52 (2001) 6, S. 36-40.
- [5.30] *Geinitz, V.; Lutz, S.*: Herstellung von Schraubendruckfedern mit höherem elastischen Formänderungsvermögen. Draht 51 (2000) 4, S. 33-36.
- [5.31] *Geinitz, V.; Lutz, S.*: Schraubendruckfedern mit höherem elastischen Formänderungsvermögen und besserem Setzverhalten. Draht 50 (1999) 3, S. 42-44.
- [5.32] *Georges, Thomas u. a.*: Lebensdauersimulation an Tragfedern im Abgleich mit experimentell ermittelten Ergebnissen. ATZ 100 (1998), Heft 12, S. 904-909.
- [5.33] *Gerolsky, W.*: Die Berechnung der Biegungs- und Torsionsfedern. Frankfurt a. M.: Akademisch-Technischer Verlag Johann Hammel 1918.
- [5.34] Gewickelte Schraubentellerfeder. Dr. Werner Röhrs KG, Sonthofen/Allgäu: Firmenprospekte 1993.
- [5.35] *Goetzke, R.*: Zur Theorie der Torsion rechteckig-prismatischer Stäbe. VDI-Z. 53 (1909) 24, S. 935-940.
- [5.36] *Göhner, O.*: Die Berechnung zylindrischer Schraubenfedern. VDI-Z. 76 (1932) 11, S. 269-272 mit Berichtigung auf S. 352 und Ergänzung S. 735.
- [5.37] *Göhner, O.*: Schubspannungsverteilung im Querschnitt einer Schraubenfeder. Ing. Archiv (1930), S.619 und (1931), S.381.
- [5.38] *Göhner, O.*: Schubspannungsverteilung im Querschnitt eines gedrillten Ringstabes mit Anwendung auf Schrauben-Federn. Ing. Archiv 2 (1931), S. 1.
- [5.39] *Grashof, F.*: Theorie der Elastizität und Festigkeit. Berlin 1878.
- [5.40] *Grigorjan, A. T.; Fradlin, B. N.*: Istorija Mehaniki tverdogo tela (Geschichte der Mechanik starrer Körper). Moskwa: Isdatelstvo „nauka“ 1982.

- [5.41] *Gross, S.*: Berechnung und Gestaltung von Metallfedern. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg/ Göttingen: Springer-Verlag 1960 (1. Auflage 1942; 2. Auflage 1951).
- [5.42] *Gross, S.*: Die Beanspruchung beim Dauerprüfen zylindrischer Schraubenfedern. Draht 7 (1956) 4, S. 116 – 119.
- [5.43] *Gross, S.*: Drehschwingungen zylindrischer Schraubenfedern. Draht 15 (1964) 8, S. 530 – 534.
- [5.44] *Gross, S.*: Nicht-kreiszyllindrische Schraubenfedern. Draht 6 (1955) 6, S. 218 – 221.
- [5.45] *Gross, S.*: Zur Berechnung der Drehstabfeder mit Kreisquerschnitt. Techn. Mitteilungen Krupp 1940, Heft 2, S. 33 – 36.
- [5.46] *Gross, S.*: Zur Berechnung der Spiralfeder. Draht 11 (1960) 8, S. 455 – 458.
- [5.47] *Gross, S.*: Zylindrische Schraubenfedern mit ungleichförmiger Steigung. Draht 10 (1959) 8, S.358 – 363.
- [5.48] *Gross, S.; Lehr, E.*: Die Federn. Berlin: VDI-Verlag 1938.
- [5.49] *Gross, Siegfried*: Druckbeanspruchte Kegelstumpffedern mit gerader Kraft-Weg-Linie. VDI-Z. 74 (1930) 52, S. 1759-1762.
- [5.50] *Guillery, C.*: Die selbsttätige Kupplung der Eisenbahnfahrzeuge. VDI-Z. 57 (1913) 48, S. 1895-1900.
- [5.51] *Hager, K.; Meissner, M.; Unbehaun, E.*: Berechnung metallischer Federn als Energiespeicher. Jena: Kombinat Carl Zeiss JENA 1977, AUTEVO-Informationsreihe Heft 12/1 und 12/2.
- [5.52] *Hahn, H. G.*. Technische Mechanik. München/Wien: C. Hanser Verlag 1990.
- [5.53] *Hanák, B.*: Wahl der optimalen Parameter von Federmotoren und Triebwerken für Registriergeräte. Feingerätetechnik 16 (1967) 3, S. 98 – 99.
- [5.54] *Hanke, Werner; Goes, Georg; Pauwels, Armin*: Gefüge von Stahl und Arbeit; Die Unternehmensgeschichte von Hoesch Hohenlimburg 1619 – 2001, Buchausgabe 2002.
- [5.55] *Haringx, J. A.*: On highly compressible helical springs und rubber rods and their application for vibration-free mountings. Phillips Res. Rep. 4 (1949), S. 49 – 80.
- [5.56] *Hempel, M.*: Anwendung physikalisch-metallkundlicher Untersuchungsverfahren bei der Dauerschwingprüfung von Werkstoffen. Draht 11 (1960) 4, S. 151 – 157.
- [5.57] *Hempel, M.*: Dauerfestigkeitsprüfungen an Stahldrähten. Draht 6 (1955) 4, S. 119 – 129 und 5, S. 178 – 182.

- [5.58] *Hempel, M.*: Einfluss der Schmelzführung und von Legierungszusätzen auf die Dauerschwingfestigkeit von Stählen, insbesondere Federstählen. Draht 11 (1960) 8, S. 429 – 437.
- [5.59] *Hempel, M.*: Über einige technologische Einflüsse auf die Dauerschwingfestigkeit von Stählen. Draht 11 (1960) 9, S. 589 – 600.
- [5.60] *Herber, R.*: Optimale Metallfedern. Maschinenbautechnik 17 (1968) 6, S. 282 – 285.
- [5.61] *Hildebrand, S.*: Zur Berechnung von Torsionsbändern im Feingereätebau. Feinwerktechnik 61 (1957) 6, S. 191.
- [5.62] Historical Facts About the Use of Springs (Historische Fakten über die Anwendung von Federn). Springs Magazine Bristol 13 (1974) 1, S. 9, 11, 12, 15, 16, 19 und 2, S. 17, 19, 21, 24, 27.
- [5.63] Hoesch Hohenlimburg AG: Warmgeformte Federn, 2. Ausgabe 1987.
- [5.64] *Holfeld, A.*: Zur Berechnung der Triebfedern mit Federhaus. Wiss. Z. d. TU Dresden 17 (1968) 4, S. 1031.
- [5.65] *Hooke, R.*: Lecture de potentia restitutiva. London 1678.
- [5.66] *Hübner, W.*: Deformationen und Spannungen bei Tellerfedern. Konstruktion 34 (1982) 10, S. 387 – 392.
- [5.67] *Huhnen, J.*: Entwicklungen auf dem Federgebiet. Teil I: Draht 17 (1966) , S.669 – 681 und Teil II: Draht 18 (1967) 8, S. 592 – 612.
- [5.68] *Huhnen, Joachim*: Schraubenzugfedern. DRAHT 38 (1987) 2, S. 109-111.
- [5.69] *Hülse, J. A.*: Allgemeine Maschinen-Encyclopädie, 2. Band. Leipzig: Verlag von L. Voß 1844.
- [5.70] *Hurlbrink, E.*: Berechnung zylindrischer Druckfedern auf Sicherheit gegen seitliches Ausknicken. VDI-Z. Bd. 54 (1910) 4, S. 133 – 137 und 5, S. 181 – 184.
- [5.71] HÜTTE: Des Ingenieurs Taschenbuch, 4. Auflage. Berlin: Verlag von Ernst & Korn 1862 (1. Aufl. 1846; 2. Aufl. 1858; 3. Aufl. 1860).
- [5.72] *Jahnke, J.*: Spiral-, Trieb- und Rollfedern aus Bandstahl. Esslingen: Technische Akademie, Lehrgang: Kaltgeformte Federn 2002 und 2004.
- [5.73] *Kaiser, B.*: Beitrag zur Dauerhaltbarkeit von Schraubenfedern unter besonderer Berücksichtigung des Oberflächenzustands. Diss. TH Darmstadt 1981.
- [5.74] *Kaiser, B.*: Dauerfestigkeitsschaubilder für hochbeanspruchte Schraubendruckfedern. Draht 53 (2002) 4, S 48-53.

- [5.75] *Kaiser, B.*: Dauerfestigkeitsuntersuchungen an biegebeanspruchten Federn aus Federbandstahl. Draht 38 (1987), S. 281-286 und S. 675-680.
- [5.76] *Kaiser, B.*: Federwerkstoffe im Dauertest. Drahtwelt 79 (1993) 4, S. 14-19.
- [5.77] *Kaiser, B.*: Ermittlung von Relaxationsschaubildern für hochbeanspruchte Schraubendruckfedern. Draht 53 (2002) 6, S. 34-37.
- [5.78] *Keitel, H.*: Die Rollfeder – ein federndes Maschinenelement mit horizontaler Kennlinie. Draht 15 (1964) 8, S. 534 – 538.
- [5.79] *Kirsch, R.*: Theorie der Federn. VDI-Z. Bd. 42 (1898) 16, S. 429 – 436.
- [5.80] *Kletzin, U.*: Finite-Elemente-basiertes Entwurfssystem für Federn und Federanordnungen. Diss. TU Ilmenau 2000.
- [5.81] *Kletzin, U.*; *Geinitz, V.*; *Liebermann, K.*: Technologien zur Ausschussminimierung in der Schraubenfedernfertigung. Draht 48 (1997) 4, S. 36-43.
- [5.82] *Kloos, K.-H.*; *Kaiser, B.*: Dauerhaltbarkeitseigenschaften von Schraubenfedern in Abhängigkeit von Wickelverhältnis und Oberflächenzustand. Draht 28 (1977) 9, S. 415-421 und 11, S. 539-545.
- [5.83] *Koch, R.*: BI-Lexikon Uhren und Zeitmessung. Leipzig: Bibliogr. Institut 1987.
- [5.84] *Koenemann, E.*: Die Entwicklung der Forschung in den Jahren 1931 und 1932. VDI-Z. 77 (1933) 13, S. 329-335.
- [5.85] *Krebs, A.*; *Nestler, W.*: Optimierung zylindrischer Druckfedern mit Hilfe des programmierbaren Kleinrechners K 1002. Maschinenbautechnik 31 (1982) 11, S. 507-508 u. 518.
- [5.86] *Kreissig, E.*: Biegungs-, Zug- und Druckfedern in bezug auf die Fahrzeugfederung. Glasers Ann. 95 (1924), S. 114 und DP 358 328 Ringfeder.
- [5.87] *Kreissig, E.*: Der Pufferstoß. Eisenbahn-Techn. Rundschau (1952) 5 und 11.
- [5.88] *Kreissig, Ernst*: Berechnung des Eisenbahnwagens. Köln-Lindenthal: Ernst Stauf Verlag 1936.
- [5.89] *Krickau, O.*; *Huhnen, J.*: Federbrüche und ihre Beurteilung. Draht 23 (1972) 10, S. 653 – 659.
- [5.90] *Krohn, R.*: Das Prinzip der kleinsten Deformationsarbeit. VDI-Z. Bd. 28 (1884), S. 320-323.
- [5.91] *Kutzbach, K.*: Untersuchungen über die Wirkung und Anwendung von Pendeln und pendelnden Massen im Maschinenbau. VDI-Z. 61 (1917) 46, S. 917-921 und 47, S. 940-948.

- [5.92] Langen & Sondermann: Tragfedern aus Stahl für Schienenfahrzeuge, 2002.
- [5.93] *Langer, P.; Thomé, W.*: Dynamische Untersuchung von Eisenbahnpuffern. VDI-Z. 75 (1931) 32, S. 1013-1018.
- [5.94] *Laubenheimer, G.*: Großgüterwagen für Massenverkehr. VDI-Z. 66 (1922) 38, S. 885-890.
- [5.95] *Lehmann, W.* : Ein Beitrag zur Optimierung von Spiralfedern ohne Windungsabstand. Diss. TH Ilmenau 1977.
- [5.96] *Lehr, Ernst*: Der Einfluss einer Flüssigkeitsdämpfung der Fahrzeugfederung auf Bewegungsverlauf und Stoßhaftigkeit. VDI-Z. 78 (1934) 23, S. 721- 727.
- [5.97] *Lehr, Ernst*: Die schwingungstechnischen Eigenschaften des Kraftwagens und ihre messtechnische Ermittlung. VDI-Z. 78 (1934) 10, S. 329-335.
- [5.98] *Lehr, Ernst*: Schwingungen in Ventilsfedern. VDI-Z. 77 (1933) 18, S. 457-462.
- [5.99] *Lehr, Ernst*: Schwingungsfragen der Fahrzeugfederung. VDI-Z. 74 (1930) 32, S. 1113-1119.
- [5.100] *Lehr, Ernst*: Wege zu einer wirklichkeitsgetreuen Festigkeitsberechnung. VDI-Z. 75 (1931) 49, S. 1473-1478.
- [5.101] *Lentz, G.*: Doppeltragfedern für Eisenbahnfahrzeuge. VDI-Z. Bd. 37 (1893), S. 1140.
- [5.102] *Liebermann, K.*: Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für Schraubendruckfedern. Diss. TU Ilmenau 2002.
- [5.103] *Liebermann, K.; Geinitz, V.; Schorcht, H.-J.; Weiß, M.*: Einflüsse der End- und Übergangswindungen auf Funktion und Betriebsverhalten von kaltgeformten Schraubendruckfedern. Draht 55 (2004) 3/4 (in Vorbereitung).
- [5.104] *Liesecke, Georg*: Berechnung zylindrischer Schraubenfedern mit rechteckigem Drahtquerschnitt. VDI-Z. 77 (1933) 16, S. 425-426, Berichtigung und Ergänzung Nr. 32, S. 892.
- [5.105] *Lindner, G.*: Die Bemessung der Federn für pendelnde Massen. VDI-Z. 61 (1917) 45, S. 907-912.
- [5.106] *Luttmann, J.*: Die Durchbiegung rotierender Schraubenfedern. VDI-Z. Bd. 51 (1907) 45, S. 1788 - 1791.
- [5.107] *Lutz, S.*: Neue Aspekte zur Berechnung der Kennlinien von Schraubendruckfedern. 44. IWK TU Ilmenau 1999, Tagungsband 3, S. 207 – 212.
- [5.108] *Lutz, S.; Geinitz, V.; Kletzin, U.*: Berechnung der Eigenfrequenzen von Schraubenfedern. Draht 49 (1998) 4, S. 44, 46, 48.

- [5.109] *Lutz, St.*: Kennlinie und Eigenfrequenzen von Schraubenfedern. Diss. TU Ilmenau 1999.
- [5.110] *Magg, J.*: Schwingungserscheinungen in zylindrischen Schraubenfedern und die Gesetze des Schlagens von Ventilsteuerungen. Verh. des Vereins zur Bef. des Gewerbefleißes 1912, S. 480.
- [5.111] *Mahlke, M.*: Einbaurichtlinien für Tellerfedern. Das Industrieblatt 62 (1962) 11, S.655-659.
- [5.112] *Maier, K. W.*: Die stoßbelastete Schraubenfeder. KEM (1966) 2, S.13 u. 14; 3, S. 11, 12, 15 und 16; 4, S. 20-24 und 27; 9, S. 14-20; KEM (1967) 1, S. 14-16; 2, S. 11-13; 3, S. 19, 20, 23 und 24; 4, S. 21-24 und 27; 12, S. 10-12, 15 und 16.
- [5.113] *Matschoß, C.*: Der Verein deutscher Ingenieure 1933. VDI-Z. 78 (1934) 8, S. 253-263.
- [5.114] *Mehner, G.*: Beitrag zur Berechnung einer allgemeinen Schraubenfeder. Diss. TH Ilmenau 1970.
- [5.115] *Meissner, M.*: Stand der Festigkeitsberechnungen kaltgeformter zylindrischer Schraubendruckfedern. Maschinenbautechnik 15 (1966) 3, S. 127 – 132.
- [5.116] *Meissner, M.*: Untersuchung bestimmter Einflüsse auf die Dauerfestigkeit kaltgeformter zylindrischer Schraubendruckfedern. Diss. TH Ilmenau 1968.
- [5.117] *Meissner, M.*: Untersuchungen über den Einfluss des Wickelverhältnisses auf die Dauerfestigkeit kaltgeformter zylindrischer Schraubendruckfedern. Maschinenbautechnik 17 (1968) 5, S. 231 – 236.
- [5.118] *Meissner, M.*: Zur Korrektur der wirksamen Windungszahlen von Schraubendruckfedern. Draht 46 (1995) 10, S. 496 – 500.
- [5.119] *Meissner, M.; Matschke, G.-D.*: Anwendung heuristischer Programme zur Dimensionierung elastischer Federn. Feingerätetechnik 20 (1971) 8, S. 377-378.
- [5.120] *Meissner, M.*: Beitrag zur Parameteroptimierung von Federn. Draht 44 (1993) 6, S. 365 – 368.
- [5.121] *Meissner, M; Schorcht, H.-J.*: Metallfedern. Berlin/Heidelberg/ New York: Springer-Verlag 1997 und 2007.
- [5.122] *Meissner, M; Wanke, K.*: Handbuch Federn, 2. Auflage. Berlin/München: Verlag Technik GmbH 1993 (1. Auflage 1988).
- [5.123] *Meyer, V.*: Die Berechnung der Evolutfeder (Bufferspirale). VDI-Z. Bd. 44 (1900) 52, S. 1791 – 1793.



- [5.124] *Micke, Derk*: Standardisierte Berechnungsmethoden für Schraubendruckfedern. VDFI-Forschungsprojekt an der TU Ilmenau, 2002.
- [5.125] Mitteilungen: Reibungsfeder für Güterwagen. VDI-Z. 72 (1928) 21, S. 694.
- [5.126] MUBEA-Tellerfedern-Handbuch. Firmenschrift von Muhr & Bender, Attendorf 1987.
- [5.127] *Muhr, K.-H.; Niepage, P.*: Über die Reduzierung der Reibung in Tellerfedersäulen. Konstruktion 20 (1968) 10, S. 414 – 417.
- [5.128] *Muhr, K.-H.; Niepage, P.*: Zur Berechnung von Tellerfedern mit rechteckigem Querschnitt und Auflageflächen. Konstruktion 18 (1966) 1, S. 24 – 27 und 19 (1967) 3, S. 109 – 111.
- [5.129] *Müller, A.*: Berechnung von zylindrischen Schraubenfedern mit rundem und quadratischem Querschnitt. Werkstattstechnik (1914), S. 395 u. 1917.
- [5.130] *Müller, E.*: Konstruktion hydraulischer Sicherheitsventile. VDI-Z. 53 (1909) , 2124.
- [5.131] *Müller-Breslau, H. F. B.*: Die Sätze von der Formänderungsarbeit und ihre Bedeutung für die Festigkeitslehre. VDI-Z. Bd. 28 (1884), S. 577-582.
- [5.132] *Neuburger, A.*: Die Technik des Altertums, 4. Auflage. Leipzig: Verlag R. Voigtländer 1981.
- [5.133] *Neuhaus, F.*: Die Normung in Deutschland. VDI-Z. 68 (1924) 41, S. 1065-1070.
- [5.134] *Niepage, P.*: Vergleich verschiedener Verfahren zur Berechnung von Tellerfedern. Draht 34 (1983) 3, S. 105 – 108 und 5, S. 251 – 255.
- [5.135] *Niepage, P.*: Zur Berechnung großer elastischer ebener Verformungen von Biegefedern. Draht 25 (1974) 6, S. 347 – 355.
- [5.136] *Oehler, G.*: Biegen. München: Carl Hanser Verlag 1963.
- [5.137] *Otzen, U.*: Über das Setzen von Schraubenfedern. Diss. TH Stuttgart 1955.
- [5.138] *Palm, J.*: Formfedern in der Feinwerktechnik. Feinwerktechnik & Messtechnik 83 (1975) 3, S. 105.
- [5.139] *Palm, J.*: Konstruktionsmerkmale und Berechnung einiger gekrümmter Biegefedern. Feinwerktechnik 68 (1964) 7, S. 262 – 267.
- [5.140] *Palm, J.; Thomas, K.*: Berechnung gekrümmter Biegefedern. VDI-Z. 101 (1959) 8, S.301.

- [5.141] *Pomp, M.; Hempel, M.*: Dauerfestigkeit von Schraubenfedern unterschiedlicher Fertigungsart. Archiv für das Eisenhüttenwesen 21 (1950) 7/8, S. 243 – 262.
- [5.142] *Poncelet, J. V.*: Lehrbuch der Anwendung der Mechanik auf Maschinen. (Deutsch herausgegeben von Dr. C. H. Schnuse). Darmstadt: Verlag von C.W. Leske 1848.
- [5.143] *Proell, R.*: Neue Flachregler mit regelbarer Umlaufzahl. VDI-Z. 53 (1909) 15, S. 568-572.
- [5.144] *Proell, R.*: Rechentafel für Federberechnungen. VDI-Z. Bd. 50 (1906) 27, S. 1076 – 1077.
- [5.145] Programmsystem HEXAGON, Industriesoftware GmbH Kirchheim/Teck 1996.
- [5.146] Programmsystem MABAU, COSOFT computer consulting GmbH Coesfeld 1996.
- [5.147] Programmsystem ME DESIGN, Tedata GmbH Bochum 1996.
- [5.148] *Rausch, E.*: Die Steifigkeit von Schraubenfedern senkrecht zur Federachse. VDI-Z. 78 (1934) 12, S. 388-389, Ergänzung und Berichtigung in Nr. 32, S. 964.
- [5.149] *Redtenbacher, F.*: Die Gesetze des Locomotiv-Baues. Mannheim: Verlag von Friedrich Bassermann 1855.
- [5.150] Reibungsfeder RINGFEDER®. Firmenschrift der Ringfeder GmbH Krefeld 1993.
- [5.151] *Reuleaux, F.*: Lehrbuch der Kinematik. Braunschweig: Verlag v. Vieweg & Sohn 1875.
- [5.152] *Reuleaux, F.*: Über die Konstruktion und Berechnung der für den Maschinenbau wichtigsten Federarten. Winterthur: Verlag von J. Wurster & Comp. 1857.
- [5.153] *Reynal, Camille*: Federn und ihre schnelle Berechnung. Deutsche Übersetzung nach der 2. Auflage des franz. Originals von C. Koch, Verlag Otto Spamer, Leipzig, 1929.
- [5.154] *Rothhaas, L.*: Der Einfluss der Krümmung auf die Spannungsverteilung bei zylindrischen Schraubenfedern. VDI-Z. 75 (1931) 42, S. 1315-1316 (Rundschaubearbeitung mit Berichtigung in Nr. 49, S. 1496).
- [5.155] *Röver, A.*: Beanspruchung zylindrischer Schraubenfedern mit Kreisquerschnitt. VDI-Z. Bd 57 (1913) 48, S. 1906 – 1911.
- [5.156] *Röver, A.*: Zeichnerische Ermittlung der Durchbiegungs- und Spannungsverhältnisse einer unter Fliehkraftwirkung stehenden Schraubenfeder mit radialer Achse. VDI-Z. Bd. 53 (1909) , S. 1272.
- [5.157] Rundschau: Eisenbahnwesen. VDI-Z. 69 (1925) 52, S. 1644/45.

- [5.158] *Sander, W.*: Uhrenlehre. (Reprint der Originalausgabe von 1925). Stuttgart: Rühle-Diebener-Verlag, Reprint 1985.
- [5.159] *Schoene, K.*: Ventildfeder für ein großes Ringventil. VDI-Z. Bd. 56 (1912), S. 1251.
- [5.160] *Schoene, K.*: Versuche mit großen, durch Blattfedern geführten Ringventilen für Kanalisationspumpen und Beiträge zur Dynamik der Ventilbewegung. VDI-Z. 57 (1913) 32, S. 1246-1255.
- [5.161] *Schorcht, H.-J.; Kletzin, U.; Micke, D.; Wauro, F.*: Entwicklung eines modularen, wissensbasierten CAD/FEM-Systems zur integrierten Berechnung und Gestaltung von Federn und Federanordnungen. Wolfgang Beitz zum Gedenken. Berlin: Springer-Verlag 1999, S. 543-557.
- [5.162] *Schorcht, H.-J.; Meissner, M.; Nönnig, R.; Schüller, U.*: Stand der Federberechnungen und Möglichkeiten der rechtechnischen Umsetzung. Draht 42 (1991) 10, S. 747-754.
- [5.163] *Schorcht, H.-J.; Meissner, M.; Seidel, U.*: CAD-Bausteine für die Berechnung und Auswahl von Schraubenfedern. 6. Schiffstechn. Symposium an der WPU Rostock 1989, Sonderheft Band 4, S. 270-283.
- [5.164] *Schorcht, H.-J.; Meissner, M.; Wauro, F.*: Federn in der Mikro-technik zuverlässig anwenden. Materialprüfung 37 (1995) 7/8, S. 273 – 280.
- [5.165] *Schorcht, H.-J.; Meissner, M.; Wauro, F.*: Federn in mikromechanischen Strukturen. Draht 44 (1993) 4, S. 207 – 218.
- [5.166] *Schorcht, H.-J.; Mickke, D.; Wittkopp, T.*: Offenes Entwurfssystem für Federungen. 3. Workshop Konstruktionstechnik an der Uni Rostock 2001, Tagungsband S. 211-218.
- [5.167] *Schorcht, H.-J.; Wittkopp, T.; Micke, D.*: Mehrkörpersimulation von Schraubenfedern. Dresdner Maschinenelemente Kolloquium 2003. Aachen: Wissenschaftsverlag Mainz 2003, S. 449-462.
- [5.168] *Schüle, W.*: Zur Gesetzmäßigkeit der elastischen Dehnungen. VDI-Z. 47 (1903) 28, S. 1014 – 1016.
- [5.169] *Schwarz, M. v.*: Spiralfedern. VDI-Z. 76 (1932) 39, S. 930 (Kurzbeitrag), Ergänzung: VDI-Z. 77 (1933) 7, S. 176.
- [5.170] *Siebeck, H. A.*: Beitrag zur Berechnung der zylindrischen Schraubenfedern. VDI-Z. Bd. 55 (1911), S. 2177.
- [5.171] *Sonnemann, R.*: Geschichte der Technik. Edition Leipzig 1978.
- [5.172] *Speckens, F.-W.*: Optimierungsstrategien für die Auslegung von Ventildfedern in Tassenstößelventiltrieben. Diss. TH Aachen 1994.
- [5.173] *Sprague de Camp, L.*: Ingenieure der Antike. Wien/Düsseldorf: Econ Verlag

- [5.174] Stahlwerke Brüninghaus GmbH: Technische Daten Fahrzeugfedern.  
Teil 1: Drehfedern, 1973, Teil 3: Stabilisatoren, 1969.
- [5.175] *Stark, H.*: Untersuchungen an Blattfedern. VDI-Z. 75 (1931) 51, S. 1521-1526.
- [5.176] *Stiebeiner, Michael*: Simulationsmodell für Schraubenfedern.  
Broschüre der Hoesch Hohenlimburg AG zur IAA 1991.
- [5.177] *Stribeck, R.*: Dauerfestigkeit von Eisen und Stahl bei wechselnder Biegung, verglichen mit den Ergebnissen des Zugversuchs. VDI-Z. 67 (1923) 26, S. 631-636.
- [5.178] *Stüssi, F.*: Die Theorie der Dauerfestigkeit und die Versuche von A. Wöhler. Zürich: Verlag V.S.B. 1955.
- [5.179] *Szabo, I.*: Die Geschichte der mechanischen Prinzipien und ihre wichtigsten Anwendungen, 3. Auflage. Basel/Stuttgart: Birkhäuser Verlag 1987.
- [5.180] *Szabo, L.* Einführung in die Technische Mechanik. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer Verlag 1954.
- [5.181] *Tänzer, W.*: Membranfedern als Bausteine für Federführungen. Diss. TH Ilmenau 1984.
- [5.182] *Tolle, M.*: Die Durchbiegung rotierender Schraubenfedern. VDI-Z. 52 (1908) 50, S. 1994 - 1997.
- [5.183] *Trinks, W.*: Berechnung der Federn für die Ventile von Dampfmaschinen und Kompressoren. VDI-Z. Bd. 42 (1898) 42, S. 1162 – 1168.
- [5.184] *Unbehaun, E.*: Beitrag zur optimalen Dimensionierung von Kontaktblattfederkombinationen. Diss. TH Ilmenau 1971.
- [5.185] *Unbehaun, E.*: Berechnungsgrundlagen zur optimalen Dimensionierung von Kontaktblattfederkombinationen für die Schwachstromtechnik. Wiss. Zeitschrift der TH Ilmenau 15 (1969) 1, S. 111.
- [5.186] *Wahl, A. M.*: Mechanische Federn, 2. Auflage. Düsseldorf: Verlag M. Tritsch 1966 (Übersetzung aus dem Englischen von *P. Fischer*; Originaltitel der amerikanischen Ausgabe: Mechanical Springs, 1. Auflage 1944; 2. Auflage 1963).
- [5.187] *Walz, K.-H.*: Entwurf und Konstruktion der Tellerfeder. Werkstatt und Betrieb 90 (1957), S. 311 – 316.
- [5.188] *Walz, K.-H.*: Geschlitzte Tellerfedern. Draht 32 (1981) 11, S. 608 – 609.

- [5.189] *Walz, K.-H.*: Gestaltung von Tellerfedersäulen für Werkzeug-, Vorrichtungs- und Maschinenbau. *Bleche-Rohre-Profile* 23 (1976), S. 134 – 139.
- [5.190] *Walz, K.-H.*: Warum Tellerfedern mit Trapezquerschnitt? Mitteilung Nr. 2 des Techn. Beratungsdienstes der Christian Bauer KG Welzheim.
- [5.191] *Weber, C.*: Die Lehre von der Drehungsfestigkeit. *Forsch. des Ingenieurwesens* Heft 249. Berlin: VDI-Verlag 1921, Auszug in: *VDI-Z.* 66 (1922) 31/32, S. 764-769.
- [5.192] *Wernitz, W.*: Die Tellerfeder. *Konstruktion* 6 (1954) 10, S. 361-376.
- [5.193] *Wittkopp, T.*: Simulation von Federungen. Kolloquium „50 Jahre universitäre Ingenieurausbildung im Fach Maschinenelemente“ TU Ilmenau 10/2003 und Mehrkörpersimulation von Schraubendruckfedern. Diss. TU Ilmenau 2005. In: *Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau*, Bericht Nr. 13. Ilmenau: ISLE-Verlag 2005.
- [5.194] *Wolf, W. A.*: Die Schraubenfedern, ihre Ausführungsformen, Berechnung und Herstellung. Essen: Giradet-Verlag 1950.
- [5.195] *Wolf F.*: Die Federn im feinmechanischen Geräte- und Instrumentenbau. Stuttgart: Deutscher Fachzeitschriften- und Fachbuch-Verlag GmbH 1953.
- [5.196] *Zacharias, L.*: Untersuchungen an zylindrischen Schraubenfedern mit kreisförmigem Querschnitt. Diss. TH Braunschweig 1909/1910.
- [5.197] *Zacharias, L.*: Untersuchungen an zylindrischen Schraubenfedern mit Kreisquerschnitt. *VDI-Z.* Bd. 55 (1911), S. 1801.
- [5.198] *Zvoniček, J.*: Die Durchbiegung rotierender Schraubenfedern. *VDI-Z.* 52 (1908) 8, S. 303 – 304.
- [5.199] *DIN-Taschenbuch 1*, Grundnormen, 12. Auflage. Berlin/Köln/Frankfurt (M): Beuth Vertrieb GmbH 1953.

## Kapitel 6

- [6.1] Die Deutsche Normung 1917 – 1957.
- [6.2] N DI-Mitteilungen 8. Jahrgang vom 15. Oktober 1925.
- [6.3] N DI-Mitteilungen 9. Jahrgang vom 4. Februar 1926.
- [6.4] DIN-Mitteilungen Band 12, Heft 4 vom 21. Februar 1929.

- [6.5] DIN-Mitteilungen Band 16, Heft 1/2 vom 5. Januar 1933.
- [6.6] DIN-Mitteilungen Band 16, Heft 11/12, Juni 1933.
- [6.7] DIN-Mitteilungen Band 18, Heft 7/8, April 1935.
- [6.8] DIN-Mitteilungen Band 21, Heft 11/12, Juni 1938.
- [6.9] DIN-Taschenbuch 4, 9. Auflage, März 1947.
- [6.10] Mitteilungen aus der deutschen Normung, Mai 1947.
- [6.11] 50 Jahre Deutscher Normenausschuss. Deutscher Normenausschuss (DNA) Berlin 1967.
- [6.12] Archiv der TU Dresden (AvMZ).
- [6.13] Sitzungsberichte der Berliner Mathematischen Gesellschaft, Berlin 2001.
- [6.14] Geschäftsbericht des DIN vom Jahr 2000, Ausgabe 4/2000.
- [6.15] Deutscher Normenausschuss, Normheft 8. Berlin W15: Beuth-Vertrieb GmbH 1949.
- [6.16] Gesamtwirtschaftlicher Nutzen der Normung. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.. Berlin: Beuth-Vertriebs GmbH 2000.
- [6.17] HÜTTE, Des Ingenieurs Taschenbuch, 28. Auflage. Berlin: 1954.
- [6.18] DIN-Taschenbuch 1, Grundnormen, 12. Auflage. Berlin/Köln/Frankfurt (M): Beuth-Vertrieb GmbH 1953.
- [6.19] *Neuhaus, F.*: Die Normung in Deutschland. VDI-Z. 68 (1924) 41, S. 1065-1070.

## Kapitel 7

- [7.1] 100 Jahre Gebr. SCHMIDT - GS-Federn Wuppertal-Cronenberg. Firmenschrift 1980.
- [7.2] 100 Jahre KERN-LIEBERS. Schramberg: Festschrift der H. Kern und Liebers GmbH & Co., Platinen- und Federnfabrik, Privatdruck 1988.
- [7.3] 100 Jahre SCHERDEL Technische Federn. Marktredwitz: Festschrift der Technische Federn Sigmund Scherdel GmbH Marktredwitz, Firmenschrift/Privatdruck 1990.
- [7.4] 1920 von Magdeburg nach Sonthofen 1970 - 50 Jahre Dr. Werner Röhrs KG. Sonthofen: Festschrift der Firma Dr. Werner Röhrs KG, Fabrik für Stahlverformung Sonthofen/Allgäu. Firmenschrift/Privatdruck 1970.
- [7.5] Ahle Federn: 100-jähriges Firmenjubiläum 2004.
- [7.6] Badische Zeitung vom 31.03.2009.
- [7.7] *Betschart, H.*: Unruh, die Blütezeit des Uhrmacherhandwerks. Verlag Nagel & Kimche 2003.

- [7.8] *Bleicher, W.*: Die Anfänge des Federnwerkes in Oege. Hohenlimburger Heimatblätter, Heft 8/1991, S. 264-271.
- [7.9] *Bleicher, W.*: Aus der Geschichte der Firma Hoesch Hohenlimburg GmbH. Hohenlimburger Heimatblätter, Heft 9/1996, S. 321-358.
- [7.10] *Böttcher, R.; Wilde, G.*: Die Geschichte des Uhrmacherhandwerks, Teil II, Goslar.
- [7.11] *Brüninghaus, Ernst*: Geschichte der Stahlwerke Brüninghaus Werdohl i. W. Sonderdruck aus der Monatsschrift der Siemens-Rheinelbe-Schuckert-Union (Montangruppe) „Das Werk“, Heft XI und XII 1923.
- [7.12] *Büschler, J.; Hoicke, Ph.*: Verband der deutschen Federnindustrie (Festschrift/Chronik zu 125 Jahre VDFI. Hagen: Dömröse Druck GmbH 2007.
- [7.13] *Feldhaus, F. M.*: Die Geschichte der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker. Leipzig und Berlin: Verlag von Wilhelm Engelmann 1914.
- [7.14] *Funcke, Liselotte*: Tuche Sensen Federn Stahl. Hagener Industriebetriebe: ardenkuverlag, Hagen, 2003.
- [7.15] Gebr. Ahle: Prospekt 75 Jahre Ahle Federn, 1979.
- [7.16] *Hanke, Werner; Goes, Georg; Pauwels, Armin*: Gefüge von Stahl und Arbeit; Die Unternehmensgeschichte von Hoesch Hohenlimburg 1619 – 2001, Buchausgabe 2002.
- [7.17] Historical Facts About the Use of Springs (Historische Fakten über die Anwendung von Federn). Springs Magazine Bristol 13 (1974) 1, S. 9, 11, 12, 15, 16, 19 und 2, S. 17, 19, 21, 24, 27.
- [7.18] <http://www.kern-liebers.de> (Historie).
- [7.19] <http://www.scherdel.de>
- [7.20] <http://www.vitz.de>
- [7.21] <http://www.wafios.de>
- [7.22] Jubiläumsschrift „125 Jahre GEBR. SCHMIDT“ 2005.
- [7.23] *Kynčl, R.*: Illustriertes Lexikon der Uhren. Eggolsheim: Edition DÖRFLER im Nebel Verlag GmbH 2006.
- [7.24] Luhn & Pulvermacher: Eine kleine Kulturgeschichte der Feder. Hoppenstedts Wirtschafts-Archiv GmbH, Spezialdienst für Wirtschafts- und Firmendokumentation: Darmstadt – Essen, 1972.
- [7.25] Maschinen für die Drahtverarbeitung - 100 Jahre WAFIOS. Reutlingen: Wafios Maschinenfabrik 1993.
- [7.26] *Meissner, M.; Denecke, K.*: Die Geschichte der Maschinenelemente als Fachgebiet und Institut an der Technischen Universität Ilmenau von 1953 bis 2003. Berichte aus dem Institut Nr. 10, Ilmenau: ISLE-Verlag 2003.

- [7.27] *Mönnich, H.*: Aufbruch ins Revier, Aufbruch nach Europa, Hoesch 1871-1971. Jubiläumsschrift der Hoesch AG, Dortmund 1971.
- [7.28] *Nettmann, Matthias*: Geschichte der Federnwerke J.P. Grueber: Zusammenfassung zum 175jährigen Bestehen im Jahre 2003.
- [7.29] *Poppe, D., Johann, Heinrich, Moritz, von*: Geschichte der Künste und Wissenschaften, zweiter Band. Göttingen: Bei Johann Friedrich Röver 1810.
- [7.30] Stahlwerke Brüninghaus GmbH: 400 Jahre Brüninghaus, Jubiläumsband 1962.
- [7.31] Stahlwerke Südwestfalen AG: Menschen-Werke-Edelstahl; Eine Dokumentation. Druckschrift-Nr. 001, Ausgabe November 1965.
- [7.32] *Tarr, László*: Karren, Kutsche Karosse; Eine Geschichte des Wagens. Berlin: Henschel Verlag 1978.
- [7.33] Vereinigte Stahlwerke AG: Kohle-Eisen-Stahl, Ausgabe 1939.

## 8.2 Patente

- [Pat1] Kl. 47, No. 59444: Federnde Kupplung mit Zugfedern (W. Main, New York). VDI-Z. Bd. 36 (1892), S. 110.
- [Pat2] Kl. 47, No. 59456: Federnde Kupplung mit Doppeldrehfeder (M. Gawron, Stettin). VDI-Z. Bd. 36 (1892), S. 167.
- [Pat3] Kl. 47, No. 60360: Schraubenfederkupplung mit Drehfeder (E. Shaw; G. J. Harcourt, Bristol). VDI-Z. Bd. 36 (1892), S323.
- [Pat4] Kl. 47, No. 63263: Mehrgängige Schraubenfeder, hergestellt aus einem Rohr durch Ausfräsen der Windungszwischenräume (Schäfer & Budenberg, Magdeburg-Buckau). VDI-Z. Bd. 36 (1892), S. 1390.
- [Pat5] D.R.P. No. 69204: Doppeltragfeder für Eisenbahnfahrzeuge (G. Lentz, Düsseldorf). VDI\_Z. Bd. 37 (1893), S 1140 (s. a. [66]).
- [Pat6] D.R.P. No. 69154: Triebfeder (H. Kaufmann, Langerwehe). VDI-Z. Bd. 37 (1893), S. 1178.
- [Pat7] Schutzrecht WO 96/17701 (1996-06-13). *Otzen, U.; Schorcht, H.-J.; Weiß, M.*: „Verfahren und Vorrichtung zur optimalen Herstellung von Schraubenfedern auf Federwindeautomaten.“ Pr.: DE 44 43 503.7 (1994-12-07), DE 195 14 486.4.
- [Pat8] Kl. 47, Nr. 86323: Ventildfeder (Kegelfeder aus Draht, von E. Hochgesand, Mannheim). VDI-Z. 40 (1896), S. 828.



- [Pat9] Kl. 60, Nr. 90824: Federregulator (Blattfeder mit spiralförmig gewickelten Enden, von C. E. Rost&Co., Dresden). VDI-Z. 41 (1897), S. 603.
- [P10] Kl. 47, Nr. 94329: Druck- oder Zugfeder (glatte und geflanschte Hülsen werden abwechselnd ineinander gesteckt, von C. Reiter, München). VDI-Z. 42 (1898), S. 80.
- [P11] Kl. 47, Nr. 129251: Schraubenfeder für Ventile (mit unterschiedlichen Steigungsabschnitten gewickelt, von M. F. Gutermuth, Darmstadt). VDI-Z. 46 (1902), S. 784.
- [P12] Kl. 47, Nr. 19201: Tragfeder, zusammengesetzt aus Zug- und Druckstäben (*C. Leist*, Berlin). VDI-Z. 52 (1908) 25, S. 1018.
- [P13] Kl. 47, Nr. 143479: Pufferfeder (Zusammenhängende Schraubenfeder aus zwei Profil-Spiralen mit jeweils Doppelkegel innen bzw. außen; Schrauben-Ringfeder, von Westinghouse Brake Co., London). VDI-Z. 47 [1903], S. 1580.
- [P14] DRP 161 629 Terry/Redditsch 1904.
- [P15] DRP 606 718 der Siemens-Schuckertwerke AG 1934.
- [P16] DGM 1780 439 der J.C.Eckhardt AG 1958.
- [P17] DBP 3041833.
- [P18] *Huhnen, J.*: AS DE 2209340 und 2264590.
- [P19] *Schroer, B.; de Schepper, A.; Duncker, F. W.* : OS DE 19500074.
- [P20] Stumpp & Schüle KG, Beuren DGM 7431415 vom 16.1.75 Druckfeder.
- [P21] AS 2209340: Maschine zum Wickeln von Schraubenfedern aus Federdraht (*J. Huhnen*).
- [P22] DP 727414 (1939; von *A. Schnorr* zur Tellerfederzentrierung).
- [P23] DB 1273267 (von *K. H. Muhr* zur Gestaltung der Tellerfederinnen-seite).
- [P24] US Patente 3025889, 3025891, 3026012.

### 8.3 Bildquellen

Bildquellen sind jeweils bei der Bildwiedergabe im Text vermerkt. Ausdrückliche Genehmigungen für den Abdruck von Bildern liegen von der Fa. Dr. Werner Röhrs, Sonthofen/Allgäu, der Fa. Kern-Liebers, Schramberg und dem Birkhäuser Verlag, Basel vor. Einige Bilder stammen aus der Fachzeitschrift VDI-Z, Springer-VDI-Verlag, Heinrichstrasse 24, 40239 Düsseldorf (E-Mail: [vdi-z@technikwissen.de](mailto:vdi-z@technikwissen.de)), deren Veröffentlichung in dieser Publikation ebenfalls genehmigt wurde.



# Personenverzeichnis

## Textteil (Kapitel 1 – 6)

- Alexander der Große; 9  
Almen, I. O.; 10, 37, 135  
Ammareller, Sepp; 18, 20, 21  
Archimedes von Syrakus; 4, 9, 97, 119
- Bach**, Carl; 111, 115, 116, 117, 121, 123, 126, 127, 131, 139, 146, 150, 151  
Baille; 10, 134, 136  
Bauschinger, Johann; 111, 121, 139, 146, 150  
Bélidor, Bernard Forest de; 109  
Belleville, Julien-Francoise; 10, 37, 135  
Bennek ; 20  
Benz, Carl Friedrich ; 2, 129  
Bergsträsser, M.; 137, 139, 145  
Bernoulli, Jakob; 100, 102, 104, 119  
Bernoulli, Johann; 100, 102, 119  
Bessemer, Sir Henry; 14  
Biezeno, Cornelius Benjamin; 121  
Bleilöb, F.; 41  
Blondel, Nicolas François; 101  
Born, H. ; 41  
Bourdon, Eugene ; 10, 39  
Branowski, B.; 144  
Brinell, Johann August; 121  
Brix, Adolph Ferdinand Wenceslaus; 113  
Brockhaus, J.; 17  
Brühl, R.; 30
- Castigliano, Carlo Alberto; 112, 121, 127, 128, 129, 131 134, 140, 151, 152  
Cauchy, Louis Augustin; 109  
Clapeyron, Benoit Paul Emile; 111, 120  
Coriolis, Gaspard Gustave de; 113, 149  
Coulomb, Charles Augustin; 105, 107, 109, 120, 150  
Cremona, Luigi; 111, 121  
Culmann, Karl; 111, 120, 149  
Curti, G.; 144
- Daimler**, Otto; 2  
Diesel, Rudolf; 40  
d’Alembert, Jean; 100, 119  
Dubios, Fr.; 135
- Elliott**, Obadiah ; 47  
Euler, Leonhard; 99, 100, 102, 119  
Eytelwein, Johann Albert; 100, 109, 112, 120
- Fischer**, Peter; 152  
Föppl, August; 121, 145, 149  
Föppl, Ludwig; 121  
Föppl, Otto; 31, 32  
Forster; 10, 137  
Forster, E. E.; 92  
Fränkel; 129  
Fröhlich, P.; 130
- Galilei**, Galileo; 8, 97, 99, 100, 103, 105, 119, 150  
Geinitz, Veronika; 41, 146, 147  
Gerber, Heinrich Gottfried; 111, 121  
Gerdes, Johann; 14

- Gerolsky, W.; 124, 129, 131, 133, 134, 135, 137, 140, 150, 151  
 Gerstner, Franz Anton; 112, 120  
 Gerstner, Joseph Ritter von; 112, 120  
 Gesell, W.; 80  
 Göhner, O.; 41, 137, 139, 145  
 Grammel, Richard; 41, 121  
 Grashof, Franz; 115, 120, 123, 125, 126, 131, 151  
 Gregory, Olinthus; 106, 120  
 Gross, Siegfried; 36, 41, 121, 124, 131, 137, 139, 140, 143, 146, 151, 152  
 Günzburger; 10
- H**  
 Hager, Karl-Fried; 144  
 Haringx, J. A.; 146  
 Hauk, V.; 32  
 Hellmich, W.; 157  
 Hempel, Max; 15, 41, 147  
 Hendrickx, Robert; 185  
 Henlein, Peter; 10  
 Herber, R.; 144  
 Hertzner, K. H.; 37  
 Hildebrand, Siegfried; 145  
 Hodgkinson, Eaton; 109, 110  
 Holfeld, Alfons; 144  
 Hooke, Robert; 8, 10, 12, 42, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 119, 150  
 Houdremont; 20  
 Huber, A. T. ; 117, 118  
 Hübner, W.; 144  
 Hülse, Julius Ambrosius; 113, 120  
 Huhnen, Joachim; 10, 42, 43, 92, 143  
 Huntsman, Benjamin; 14  
 Hurlbrink, E.; 41, 137  
 Hußmann, A.; 41  
 Huygens, Christian; 10, 102, 119
- J**  
 Jaeschke, A.; 41
- K**  
 Kaiser, Bruno; 147  
 Keitel, H.; 36  
 Kern, Hugo; 35  
 Kick, Friedrich; 117  
 Kiencke, R.; 196  
 Kirsch, Rudolf; 131  
 Kloss, Karl-Heinz; 80, 147  
 Kötschke, P.; 15  
 Kreissig, Ernst; 10, 12, 45, 135, 151  
 Kreutzer, A.; 16  
 Krohn, R.; 129  
 Krupp, Rudolf; 60  
 Kutzbach, Karl; 121, 159, 161, 165, 169, 194  
 Ktesebios; 7, 119
- L**  
 Lagrange, Joseph Louis; 99, 100, 119  
 Lancia, Vincenzo ; 51  
 Langer, P. ; 138  
 Laplace, Pierre Simon; 120  
 Lasschke, J. ; 32  
 Lászlo, A. ; 10, 37, 135  
 Lehmann, Walter; 36, 144  
 Lehr, Ernst; 41, 121, 138, 139, 151, 152  
 Leibniz, Gottfried Wilhelm; 10, 38, 99, 100, 102, 104, 119  
 Leist, C.; 12  
 Lentz, G.; 130  
 Leupold, Jacob; 10, 12, 101, 119  
 Liebermann, Karsten; 148  
 Liesecke, Georg ; 41  
 Lombert, P. ; 10  
 Ludwik, Paul; 117  
 Luttmann, J.; 136  
 Lutz, Steffen; 41, 145
- M**  
 Macherauch, E.; 32, 81

- Mahlke, M.; 144  
 Maier, Karl W.; 149, 150  
 Manteuffel, R. Z. von ; 41  
 Mariotte, Edmé; 101, 103, 105, 119  
 Martens, Adolf; 111, 121  
 Mathis, Emil Ernst Karl; 44  
 Mehrrens, Georg Christoph; 110  
 Meissner, Manfred; 139, 143, 144, 152  
 Mehner, Gotthard; 144  
 Meyer, V.; 134, 135  
 Mises, Richard Edler von; 117, 118, 121  
 Mohr, Otto Christian; 100, 111, 121, 149  
 Morgan, H. F. S.; 51  
 Müller-Breslau, Heinrich F. B.; 129  
 Muhr, K. H.; 32, 33, 37, 144  
 Murray, G.; 90  
 Muschenbroek, Pieter van; 101, 102, 119  
  
 Navier, Claude Louis Marie Henri; 100, 101, 106, 107, 108, 120, 149  
 Nenninger, M. ; 26  
 Neuber, Heinz August Paul ; 116, 121  
 Neuhaus, Fritz; 157  
 Newton, Isaac; 98, 99, 100, 119  
 Niepage, Peter; 37, 42, 144, 153  
  
**O**tzen, Uwe; 30, 32, 148  
 Orlando, M.; 144  
  
**P**alm, Joachim; 144  
 Paudert, H.; 36  
 Perrier; 10  
 Phillip; 124  
 Philipp von Mazedonien; 9  
 Philon von Byzanz; 8, 9, 97, 119  
 Plitzko, Manfred; 188  
  
 Poisson, Siméon-Denis; 100, 109, 120  
 Pomp, Anton ; 15, 30, 41, 147  
 Poncelet, Jean Victor; 113, 122, 123, 125, 149  
 Porsche, Ferdinand ; 45, 54, 144  
 Proell, R.; 136  
 Püngel, W.; 30  
  
**R**ankine, John William Macquorn; 110, 120  
 Reaumur, René-Antoine Ferchault de; 119  
 Redtenbacher, Ferdinand ; 113, 120, 122, 124, 125, 126, 149  
 Rees, S. H.; 30  
 Reuleaux, Franz; 112, 113, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 131, 134, 145, 150, 152  
 Reynal, Camille; 151  
 Ritter, Wilhelm; 111, 121, 149  
 Röhrs, Hermann; 37  
 Röhrs, Werner; 10, 37, 38, 135  
 Röver, A.; 41, 136, 137, 145  
  
**S**aint-Venant, Adhemar Jean Claude Barré de ; 100, 108, 115, 120, 145, 149  
 Salomon ; 10  
 Salter, Georg ; 10, 12  
 Sander, W. ; 35  
 Sanders, T. H.; 53  
 Scherdel, Sigmund; 40  
 Schmid, Otto; 40  
 Schnorr, Adolf; 37  
 Schorcht, Hans-Jürgen; 139, 152  
 Schreiber; 10  
 Schremmer, G.; 32, 37  
 Schwarz, Berthold; 5  
 Schwarz, H.; 172  
 Schwier, F.; 30

- Siebe, A.; 10  
 Speckens, F.-W.; 144  
 Speer, Paul; 138  
 Stark, Helmuth; 169, 172, 194, 195  
 Stribeck, Richard; 147, 150  
 Stumpp, F.; 16
- Tänzer, Wilfried; 145  
 Tetmajer, Ludwig von; 111, 121  
 Theophilus; 27  
 Thomas; 10  
 Thomas, K.; 144  
 Thomé, W.; 138  
 Thomson, Th.; 10  
 Tolle, M.; 136  
 Totz, Richard; 127, 152  
 Tredgold, Thomas; 97, 105, 109, 113, 120
- Unbehaun, Erich; 125  
 Usher; 9  
 Uzziah; 9
- Varignon, Pierre; 102, 119  
 Veranzio; 10  
 Vidie, Lucine; 10, 38  
 Vinci, Leonardo da; 6, 7, 8, 10, 11, 28, 39, 97, 103, 105, 119
- Wagner, Ernst; 40  
 Wahl, A. M.; 135, 137, 139, 152  
 Walz, Karlheinz; 31, 37, 42, 144  
 Wanke, Klaus; 139, 152,  
 Watt, James; 109, 113  
 Weisbach, Julius Ludwig; 100, 112, 120, 149  
 Weiß, Friedrich; 40  
 Weber Constantin; 145  
 Werner, Abraham Gottlob; 109  
 Willis, Robert; 113  
 Wittkopp, Tobias; 148, 149, 150
- Wöhler, August; 109, 110, 114, 115, 116, 117, 120, 146, 150  
 Wolf, Werner A.; 41, 151
- Young, Thomas; 105, 106, 107, 109, 113, 120, 150
- Zeuner, Gustav; 113, 120, 149

## **Chroniken (Kapitel 7)**

Ahle, Adolf; 211  
 Ahle, Diedrich; 211  
 Ahle, Joachim; 211  
 Ahle, Wilhelm; 211  
 Amedick; 224  
 Arndt; 225

**Bach, Carl;** 222  
 Berger, Christina; 225, 226, 227  
 Berns; 225  
 Beduhn, Georg; 230  
 Brüninckhusen, Peter to; 206  
 Brüninghaus, Johann Caspar; 206

**Dahl;** 225  
 Denecke, Klaus; 228  
 Dietz, Herrmann; 218  
 Dietz, Peter; 218  
 Dietz, Mathias; 218  
 Drosten, Robert; 216

**Euchler, Waldemar;** 229

**Ficker, Gerhard;** 213  
 Ficker, Hans; 213  
 Funcke; 226

**Geinitz, Veronika;** 227, 228  
 Giese, Fritz; 209  
 Gratzer; 226  
 Gross, Siegfried; 222  
 Grubisic; 224  
 Grueber, Johann Peter; 207  
 Grueber, Wilhelm sen.; 208  
 Grueber, Wilhelm jun.; 208

**Hempel, Max;** 222  
 Hoffmann; 227  
 Holland; 225  
 Huhnen, Joachim; 223, 230, 232

**Ifrim, Vasile;** 228

**Kaiser, Bruno;** 223, 224, 225, 226, 227  
 Kaspar; 225  
 Kawalla; 227  
 Kletzin, Ulf; 226, 228, 231  
 Kern, Ernst Hugo; 216  
 Kern, Hugo; 204, 206  
 Kloos, Karl-Heinz; 223, 224, 225, 226  
 König; 225  
 Koepf, Klaus-Philipp; 215  
 Koepf-Röhrs, Konstanze; 215

**Lehmann, Walter;** 228  
 Lehmann; 225, 227  
 Lehnert; 225  
 Lehr, Ernst; 222  
 Liebermann, Kersten; 228  
 Lücke; 226  
 Lutz, Steffen; 227, 228

**Macherauch;** 226  
 Maier, Karl, W.; 230  
 Mehner, Gotthard; 228  
 Meissner, Manfred; 228, 229, 232  
 Micke, Derk; 225

**Nettmann, Hans Peter;** 208  
 Nettmann, Heinrich; 208  
 Nettmann, Matthias; 209  
 Neumann; 226  
 Niepage, Peter; 223

**Otzen, Uwe;** 230

**Pawelski;** 225  
 Peters; 225  
 Plitzko, Manfred; 230  
 Pomp, Anton; 222

Ponge; 226  
Poppe, D. J. H. M.; 204, 205

Rath, Emil Otto; 208  
Reich, René; 226  
Röhrs, Hermann; 214  
Röhrs, Werner; 214, 215

Scharwächter; 226  
Scherdel, Sigmund; 212  
Schmid, Otto jun.; 213  
Schmid, Otto sen.; 213  
Schmidt; 225  
Schmidt, Albert jun.; 217  
Schmidt, Albert sen.; 217  
Schmidt, Andreas; 218  
Schmidt, Christian; 218  
Schmidt, Hermann; 217  
Schmidt, Horst Albert; 218  
Schmidt, Johann Abraham; 217  
Schorcht, Hans-Jürgen; 225, 226,  
227, 228, 230, 232  
Schüller, Uwe; 228  
Steim, Hans-Jochem; 204, 216, 217  
Steim, Kurt; 216  
Svenson; 224

Tänzer, Wilfried; 228  
Tenhaeff; 207

Unbehaun, Erich; 228

Vitz, Emil; 214  
Vitz, Ewald; 214  
Vitz, Friedhelm; 214  
Vitz, Otto; 214  
Vitz, Paul; 214  
Vitz, Michael; 214  
Vitz, Johann; 214

Wagner, Ernst; 213  
Walz, Karlheinz; 222

Wanke, Klaus; 229  
Waterstradt, Else; 208  
Waterstradt, Helmut; 208  
Waterstradt, Titus; 209  
Waterstradt, Werner; 208  
Weiß, Friedrich; 212  
Weiß, Mathias; 224, 227, 228, 230  
Wettlaufer; 225  
Wiegand; 224, 226  
Wittkopp, Tobias; 228  
Wöhler, August; 222





