Das "Shot-peenen" von Zahnrädern

Autor(en): **Horowitz, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 15

PDF erstellt am: **22.09.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74095

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Innenverzahnungen

III Einstechprogramm für Innenverzahnungen.
IV Wälzprogramm zum Hobeln von Innenverzahnungen mit Schneidrändern.
V Wälzprogramm zum Fertighobeln der Innenverzahnung mit Einzahn-Werkzeug (Stichel).

Zahnstangen

VI Einstech-Teilprogramm für das Hobeln von Zahnstangen.

Für ein rasches und bedienungsfreundliches Einstellen und Einrichten der Maschine stehen *sechs Hilfsprogramme* zur Verfügung.
Die *Steuereinheit* ist eine *frei programmierbare serielle Steuerung*, welche die einzelnen Signale mit einer extrem hohen Schaltgeschwindigkeit nacheinander verarbeitet. Total werden 8192 Instruktionen bzw. Signale innerhalb von 40 Millisekunden kontrolliert und verarbeitet. Das heisst, innerhalb einer Sekunde werden alle Signale 25mal kontrolliert und verarbeitet. In der zentralen Recheneinheit können 32 768 verschiedene Instruktionen programmiert werden. Als Beispiel für eine *typische Aufgabe*, die durch diese Steuerung gelöst wird, sei der Antrieb des Werkzeugstössels erwähnt, bei dem folgende

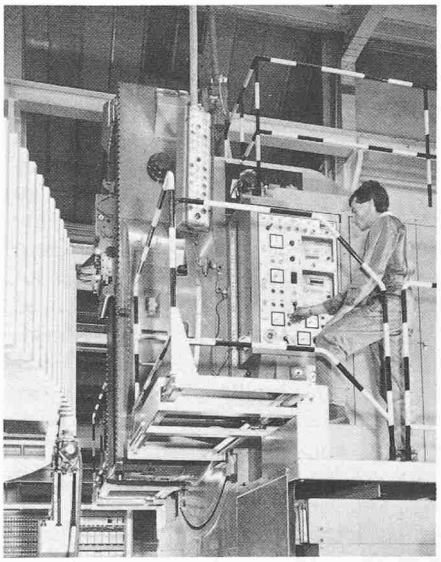

Bild 9. Für die Bedienung der Maschine wird nur noch eine Person benötigt

Funktionen kontrolliert oder gesteuert werden:
- Stösselhub und Hublage,
- Positionieren des Stössels,
- Stösselgeschwindigkeit (vorwärts/rückwärts),
- Bremsen und Beschleunigen des Stössels,
- Anzahl Stösselhübe je Zahnlücke,
- Temperatur Antriebsmotor,
- Stromaufnahme Antriebsmotor,
- Kühlluft für Antriebsmotor.

In gleicher Art werden die Funktionen des Rundtisches, des Wälzständers und des Zustellschlittens kontrolliert oder gesteuert.
Ein *elektronisches Kontrollsystem* überwacht dauernd 180 wichtige Funktionen der Maschine und meldet Störungen wie z. B. Überlastung des Antriebssystems, Ausfall von Sicherheitsverriegelungen, Druckabfall im Hydrauliksystem, Bedienungsfehler usw. Beim Autreten einer Störung leuchtet an der Kommandotafel eine Zahlenkombination auf, die durch einen Kode über die Ursache der Funktionsstörung informiert.
Die Überwachung der Maschine während des Zahnradhobelns erfolgt über eine feste Kommandotafel am Maschinenständer und über eine Hängetafel. Die Bedienung der Maschine wird dadurch sehr vereinfacht und benötigt nur eine Person (Bild 9).

Adresse des Verfassers: Dr. *P. Bloch*, Technischer Direktor, Maag-Zahnräder AG, Hardstr. 219, Postfach, 8023 Zürich.

Nach einem Vortrag, gehalten aus Anlass der Fertigstellung der Hochleistungs-Zahnradhobelmaschine SH-1200).

Das «Shot-peenen» von Zahnrädern

Von J. Horowitz, Zürich

Sowohl über das Shot-peening-Verfahren selber als auch über seine Grundlagen und Begriffe ist an dieser Stelle bereits berichtet worden [1]. Bei diesem Feinbearbeitungsverfahren der Strahltechnik wird an der Oberfläche der behandelten Werkstücke eine unter Druckvorspannung stehende Materialschicht erzeugt und so eine Erhöhung der Dauerstandfestigkeit und somit auch der Lebensdauer und der Betriebssicherheit von auf Wechselspannungen hoch beanspruchten Bauelementen erreicht.

Wirkungsweise

Gelegentlich hört man die Vermutung, die *Erhöhung der Dauerstandfestigkeit beim Shot-peenen* sei auf eine Verfestigung und Verdichtung der Werkstückoberfläche zurückzuführen. Dem ist jedoch nicht so. Ein Bruch im kritischen Querschnitt wird fast immer durch einen an der Oberfläche auftretenden Anriss eingeleitet, denn dort tritt zuallererst eine Überschreitung der zulässigen Belastung auf. Bei den nach dem Shotpeening-Verfahren behandelten Werkstücken müssen jedoch die Zug-, Schub- oder Torsionskräfte zunächst die in den äusseren Materialschichten

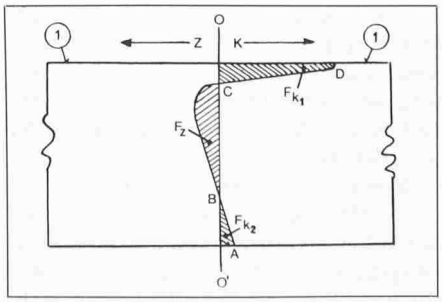

Bild 1 A. Zug- und Druckspannungen in einem keinen äusseren Belastungen unterworfenen, jedoch bereits auf der Oberseite «gepeenten» Träger oder rechteckigen Balken.
1: «gepeente» Oberseite des Trägers. 0-0': Null-Linie. Z: Zugspannungen. K: Druckspannungen.
N.B. Da Gleichgewichtszustand herrscht, müssen die beiden Flächen $F_{k1} + F_{k2}$ gleich der Fläche F_z sein

induzierten Druckvorspannungen überwinden. Der Zeitpunkt, in dem die zulässige Belastung an der Werkstückoberfläche erreicht ist, wird damit wesentlich herausgeschoben. Den dabei wirksam werdende Mechanismus veranschaulicht Bild 1A. Es zeigt zunächst die *Spannungsverhältnisse* in einem keinerlei äusseren Belastungen unterworfenen Träger oder Balken, der auf der Oberseite bereits nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt worden ist. Es herrscht *Gleichgewichtszustand*, wobei die von der Spannungsverteilkurve rechts der Nullinie im Gebiet der Druckspannungen umschlossenen beiden Flächen A-B-O' und C-D-O zusammen gleich gross sein müssen wie das auf der Seite der Zugspannungen von der Kurve eingeschlossene Flächensegment B-C. Ausserdem muss die Summe der Momente aller dieser Flächen den Wert 0 ergeben. Bild 1B veranschaulicht hingegen den Zustand, wenn der auf der Oberseite gepeente Balken einer *Biegebelastung* unterworfen wird, wobei die über die ganze Dicke des Trägers wirksam werdenden Kräfte durch die Linie L-L' gegeben sind. Die resultierende *Spannungsverteilungskurve* ergibt sich durch algebraische Addition der Abszissen der Biegekräfte *und* der durch das Shot-peenen erzeugten Vor-

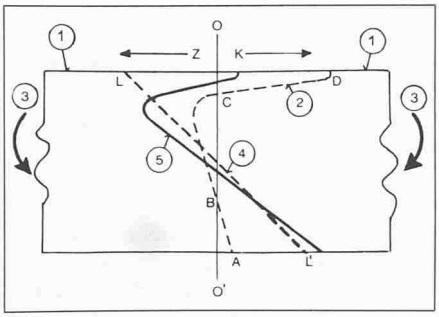

Bild 1B. Zug- und Druckspannungen in einem auf der Oberseite «gepeenten» Träger oder rechteckigen Balken bei Biegebelastung.
1: gepeente Oberseite des Trägers. 0-0': Null-Linie. Z: Zugspannungen. K: Druck-Spannungen. 2: Vom Shot-peenen herrührende Zug- und Druckspannungen. 3: Biegebelastung. 4: durch Biegebelastung erzeugte Zug- und Druckspannungen. 5: Aus Biegebelastung und Shot-peenen resultierende Spannung-Verteil-Kurve
N.B. Ein Bruch wird fast immer durch einen an der Oberfläche des Werkstückes entstehenden Anriss eingeleitet. Das Diagramm macht deutlich, wie durch Shot-peenen die einen solchen Anriss verursachenden Zugspannungen an der Oberfläche herabgesetzt werden

spannungen. Sie ist in Bild 1B als ausgezogene Linie dargestellt, während die beiden Komponenten gestrichelt eingezeichnet wurden. Man erkennt im Diagramm, in welch hohem Masse das Shot-peenen den Zeitpunkt, in dem die zulässige Belastung an der Werkstückoberfläche erreicht wird, herauszuschieben in der Lage ist, ein Mechanismus, der ganz besonders dort wirksam wird, wo aus hochwertigen Materialien gefertigte Bauelemente rasch wechselnden starken Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Der Gewinn äussert sich in einer *wesentlich verlängerten Dauerstandfestigkeit*. Man versteht darunter die Anzahl Lastwechsel bis zum Eintreten des Bruches. Es handelt sich jedoch keineswegs um einen statistisch ermittelten Durchschnittswert, sondern es wird eine repräsentative Anzahl Musterstücke in speziell für diesen Zweck gebauten Prüfmaschinen, den sogenannten *Pulsatoren*, immer wiederkehrenden gleichartigen Wechselbeanspruchungen unterworfen, bis der Prüfling zu Bruch geht. Bild 2A und 2B zeigen eine für die Untersuchung von Zahnrädern geeignete Anlage. Bild 3 veranschaulicht wie das zu untersuchende Zahnrad zwischen die Druckbacken des Pulsators eingespannt wird, wobei in dieser Stellung die Druckbacken etwa in der Nähe des Teilkreises angreifen und den Prüfling einer *angenäherten Schwellbeanspruchung* aussetzen sollen. Gezählt wird die Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch. Die Untersuchung einer ausreichenden Serie gleicher Stücke wird in Form einer Kurve als *Lebenserwartungscharakteristik* ausgewertet, wobei als Ordinate die Zahl der Lastwechsel bis zum Bruch und auf der Abszisse ein geeigneter Vergleichsmassstab aufgetragen werden. Für den letzten Wert wird bei der Prüfung von Zahnrädern zumeist die *Zahnbelastung* in kg/cm² verwendet. Um einwandfreie Vergleichsmöglichkeiten zu erhalten, wird fast immer auch eine entsprechende Anzahl gleicher, jedoch nicht gepeenter Stücke in analoger Weise im Pulsator untersucht und sodann zu einer Lebenserwartungscharakteristik für unbehandelte Zahnräder derselben Art zusammengefasst. In Bild 4 ist eine solche Darstellung wiedergegeben, wobei aus dem Beispiel gleichzeitig auch die durch das Shot-peening-Verfahren bei Zahnrädern erreichten Vorteile veranschaulicht werden. Bei diesem Diagramm handelt es sich um die von *J. C. Straub* veröffentlichten Ergebnisse einer Untersuchung an im Einsatz gehärteten gerad- und schrägverzahnten Kraftfahrzeugzahnrädern (Carburized Automotive Type Gears) [2].

Die Verwendung des Shot-Peening-Verfahrens ergibt besonders gute Ergebnisse und eine grosse Verlängerung der Lebensdauer vornehmlich bei der Behandlung von Werkstücken, die einer *Wechselbelastung durch Biege-, Torsions- oder Schubkräfte* unterworfen sind und aus *hochwertigen* und *gleichzeitig stark beanspruchten Materialien* hergestellt sind. Diese Voraussetzungen treffen in vollem Umfang auf Zahnräder jeder Art zu.

Es kommt noch ein wichtiger Faktor hinzu. Die moderne Technik ist in bezug auf den Getriebebau bestrebt, eine weitgehende *Verringerung der Gesamtabmessungen* und vor allem aber auch eine *Verkleinerung der umlaufenden Massen* unter gleichzeitiger, weitgehender Ausnützung der Werkstoffeigenschaften zu erreichen. Gerade in dieser Beziehung bietet das Shot-peening-Verfahren zusätzliche neue Möglichkeiten an. Wie aus Bild 4 hervorgeht, hat das Peenen nicht nur eine Verlängerung der Lebenserwartung des Werkstückes zur Folge, sondern auch eine Erhöhung der Belastbarkeit. Um beide Faktoren auszunutzen, ist jedoch eine Neuberechnung unter Berücksichtigung der neuen, durch das Peenen veränderten Lebenserwartungscharakteristik, erforderlich. Auf diese Fragen wird später eingegangen.

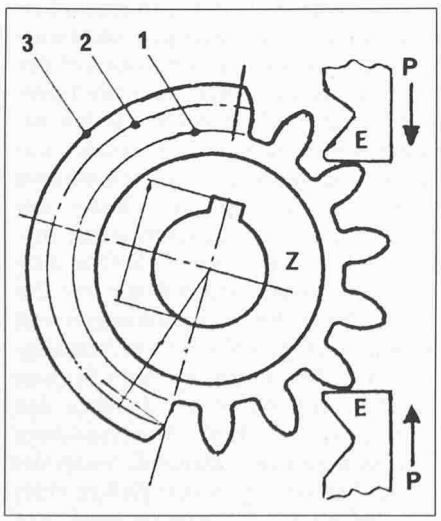

Bild 3. Anordnung für das Einspannen eines Zahnradprüflings zwischen den Druckbacken einer Pulsator-Prüfmaschine für die Untersuchung auf Dauerstandfestigkeit.
Z: Zahnradprüfling. E: Druckbacken der Hochfrequenz-Prüfmaschine (Pulsator). P: von den Druckbacken des Pulsators auf die Zähne des Rades übertragene Druckbelastung. 1: Fusskreis. 2: Teilkreis. 3: Kopfkreis

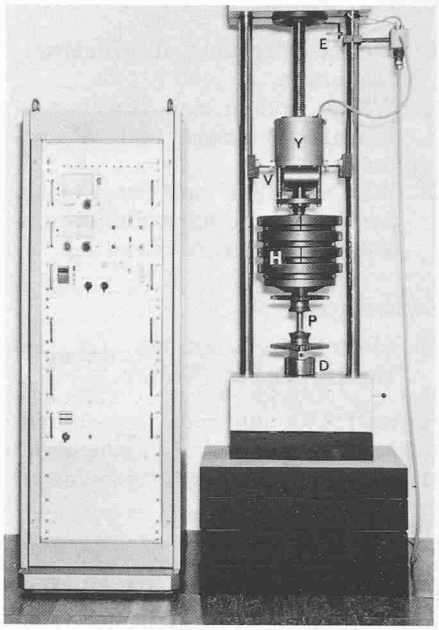

Bild 2A. Hochfrequenz-Prüfmaschine Amsler Type 10 HFP 1478 (Pulsator) mit zugehörendem Steuerschrank für die elektronische Regelung der Maschine.
E: elektronischer Enschalter. Y: Erregermagnet. V: Vorspannfeder. H: Hauptmasse. P: Probestab. D: elektronische Kraftmessdose.
Photo: Wolpert AG, Schaffhausen

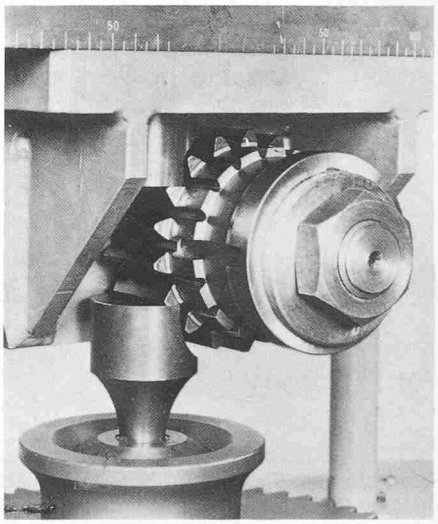

Bild 2B. Prüfen eines Probezahnrades auf Dauerstandfestigkeit unter Wechselbelastungen in einem Hochfrequenz-Pulsator gemäss Bild 2A (siehe auch Skizze Bild 3).
Photo: Wolpert AG, Schaffhausen

Der gefährdete Querschnitt

Man unterscheidet eine Reihe verschiedener Zahnräder. Allen ist jedoch gemeinsam, dass jedes ineinandergreifen-

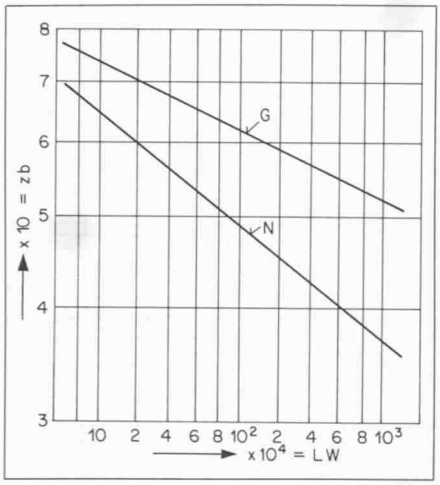

Bild 4. Lebenserwartungscharakteristik von im Einsatz gehärteten gerade- und schräg-verzahnten Zahnrädern für den PKW- sowie den LKW-Bau. Das Diagramm vermittelt die Ergebnisse einer Reihenuntersuchung über den Einfluss der Shot-peening-Behandlung auf die Dauerstandfestigkeit und beruht auf der Auswertung einer grossen Anzahl von bis zum Bruch des Prüflings geführten Tests (nach J. C. Straub [2], wobei für die Umrechnung 100 psi = 7 kg/cm² eingesetzt wurden).
zb: Belastung (computed stress) in kg/cm². LW: Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch des Prüflings. N: Dauerstandfestigkeit von nicht gepeenten Prüflingen G: Dauerstandfestigkeit von Zahnrad-Prüflingen, die nach dem Shot-peening-Verfahren mit einer Flächenüberdeckung von 98 % behandelt wurden.

de Paar ein System zur Übertragung von Drehmomenten darstellt. Bild 5 veranschaulicht diesen Vorgang am Beispiel eines Stirnräderpaares. Wie daraus hervorgeht, treten an der Berührungslinie (Wälzpunkt k) der beiden sich aufeinander abwälzenden Zahnflanken Kräfte in der Richtung der Geraden w-k auf, die bei Überschreitung der zulässigen Belastungsgrenze zum Bruch führen würden. Dieser tritt denn auch fast immer am Zahnfuss auf. Bei Zahnrädern ist dies der gefährdete Querschnitt. Man spricht deshalb auch von einer *Zahnfussfestigkeit* bzw. von einer *Zahnfuss-Dauerfestigkeit*. Es muss hier erwähnt werden, dass die sorgfältige Ausführung der sogenannten Fussausrundungen einen *zusätzlichen* günstigen Einfluss auf die Dauerstandfestigkeit von Zahnrädern ausüben kann, denn von der Bearbeitung zurückbleibende feine Haarrisse können leicht den Beginn des Bruchvorganges beschleunigen. Eine Reihe von Untersuchungen haben bestätigt, dass gerade die allerfeinsten Risse, die durch die Schleifkörnung hervorgerufen werden, die Dauerstandfestigkeit stark herabsetzen. Beim Peenen werden an solchen Oberflächenfehlern die Rissenden abgerundet und somit deren Kerbwirkung ausgeschaltet. Beim Shot-peenen ist deshalb eine *vollständig gleichartige Behandlung aller Flächen* und *insbesondere der beiden Zahnflanken* und *der Fussausrundungen* unbedingt erforderlich. Wird das Peenen in einer nach dem Druckluftsystem arbeitenden Anlage durchgeführt, ist es daher manchmal notwendig, die Behandlung unter sonst identischen Arbeitsbedingungen, jedoch mit zwei verschiedenen Düsenstellungen, durchzuführen. Ein Beispiel dieser Art - Shot-peenen von im Innern von drei Stutzen eines Nabengehäuses sich befindenden Zahnkränzen - findet sich in [3]. Die verschiedenen Begriffe sind in Bild 6 graphisch dargestellt.

Anzuwendende Strahlintensitäten

Das Shot-peenen von Zahnrädern gehört zu den *Präzisionsverfahren der Bearbeitungstechnik*. Die angestrebte Erhöhung der Dauerstandfestigkeit und der Belastbarkeit können nur erreicht werden, wenn sämtliche Paramter genau eingehalten werden. Dies gilt vor allem für die *Strahlintensität*. Das Problem liegt vor allem in der Ermittlung und in der Festlegung der Fertigungswerte. Grundsätzlich sollten zuerst ausgedehnte Prüfstandversuche durchgeführt werden, um die Daten der Shot-peening-Behandlung und auch die definitiven Abmessungen der hochbeanspruchten Zahnräder festzulegen. Dabei wird es notwendig sein, ganze Serien auf Dauerstandfestigkeit unter Wechselbeanspruchung und auf Belastbarkeit zu prüfen. Nur so lassen sich die erstaunlichen Leistungen des Shot-peening-Verfahrens erreichen, vor allem was die Erhöhung der Lebensdauer anbelangt. Weil es sich aber um ein sehr aufwendiges und dementsprechend auch teures Verfahren handelt, muss nach Möglichkeit der Zeitaufwand begrenzt werden. So müssen deshalb meist Vorversuche unter Verwendung von

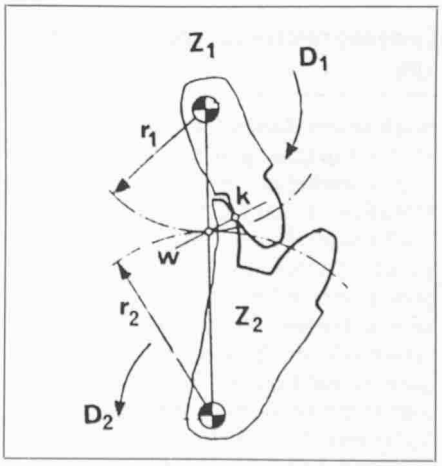

Bild 5. Drehmoment-Übertragung bei einem ineinandergreifenden Stirnrad-Paar.
Z_1: teibendes Zahnrad. Z_2: angetriebenes Zahnrad. D_1: Drehrichtung des treibenden Rades. D_2: Drehrichtung des getriebenen Rades. r_1, r_2: Radius der Teilkreise der beiden Zahnräder. w: Berührungspunkt der beiden Zeilkreise. k: Wälzpunkt.
N.B. Die auf die beiden ineinandergreifenden Zähne wirkenden Kräfte verlaufen in Richtung der durch die Punkte w und k gehenden Gerade

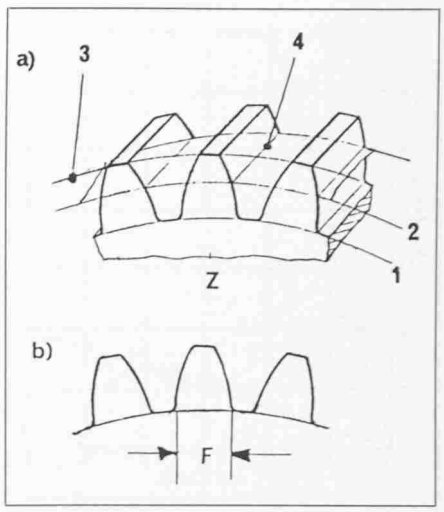

Bild 6. Definition der Materialstärke im kritischen Querschnitt beim Zahnrad mit Stirnverzahnung.
a) Lage von Teilkreis, Flankenlinie, Fuss- und Kopfkreis 1: Fusskreis. 2: Teilkreis. 3: Kopfkreis. 4: Flankenlinie. Z: Zahnrad mit Stirnverzahnung
b) Materialstärke im gefährdeten Querschnitt eines Stirnzahnrades
F: Zahndicke = Materialstärke am Zahnfuss = Materialstärke im gefährdeten Querschnitt

Richtwerten über die Stahlintensität durchgeführt werden.
Wie bereits schon dargelegt (siehe auch Diagramm Bild 5), befindet sich bei Zahnrädern der unter Bruchgefahr stehende und somit kritische Materialquerschnitt stets am Zahnfuss auf der Höhe des sogenannten Fusskreises. Es ist deshalb logisch, die Strahlintensitäten in Funktion des Parameters Zahnfussdicke (Mass «F» im Zahngrund auf Bild 6B) anzugeben. Aufgrund praktischer Erfahrungen aus den USA hat *J. C. Straub* Hinweise über für Vorversuche empfohlene Strahlintensitäts-Richtwerte zusammengestellt [4]. Sie sind dort in Tabelle 1 wiedergegeben

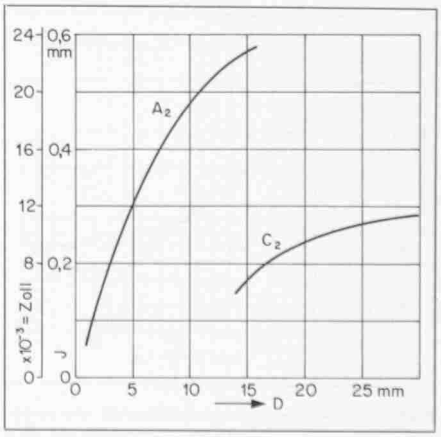

Bild 7. Behandlung von Zahnrädern aus Stahl nach dem Shot-peening-Verfahren. Das Diagramm vermittelt Richtwerte für die Strahlintensität als Funktion der Materialstärke an der kritischen Stelle des zu behandelnden Zahnrades d. h. in Funktion der Materialstärke am Zahnfuss (Zahnfussdicke: Mass F in Bild 6).
J: Strahlintensität, gemessen nach dem Almen-Test-Messverfahren. Zwei Massstäbe sind aufgetragen, der eine in Millimeter, der andere in Mikroinch (tausendstel inch). D: Materialstärke (Dicke) am Zahnfuss in Millimeter (Mass F in Bild 6). A_2: Richtwerte für die Strahlintensität bei Messung mit Almen-Test-Plättchen A_2. C_2: Richtwerte für die Strahlintensität bei Messung mit Almen-Testplättchen

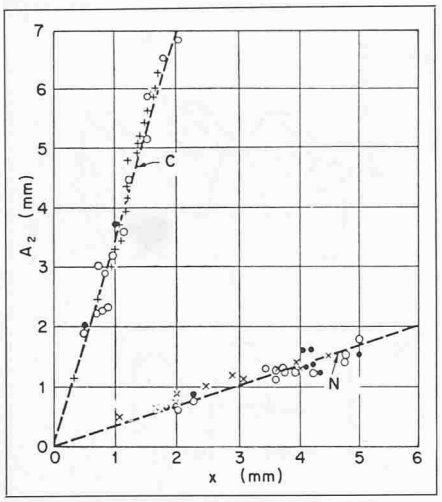

Bild 8. Diagramm zur Umwandlung von mit den drei Almen-Testplättchen A_2, C_2 oder N gemessenen Strahlintensitäten.
A_2: Strahlintensität gemessen mit Almen-Testplättchen A_2. X: Skala für Strahlintensitäten gemessen mit Almen-Testplättchen C_2 und N, je nach der für die Ablesung zu verwendenden Kurve.
N.B. Wie aus den im Diagramm eingezeichneten Messwerten aus der Praxis hervorgeht, muss mit einer beachtlichen Streuung gerechnet werden

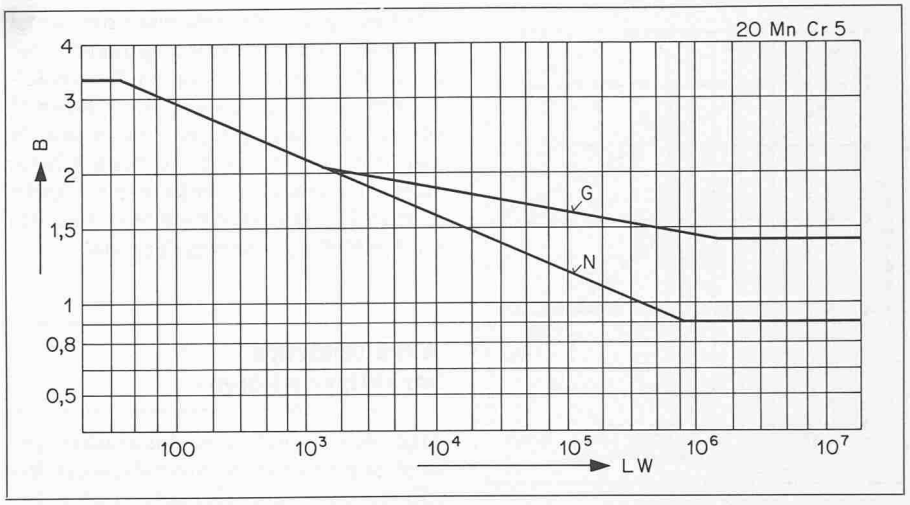

Bild 10. Lebenserwartungscharakteristik von im Einsatz gehärteten Zahnrädern auf Grund einer Reihenuntersuchung über den Einfluss des Peenens auf die Dauerstandfestigkeit, mit Prüfung in einem Pulsator. Werkstoff der Zahnrad-Prüflinge: 20 MnCr 5, Zahnzahl z = 27, Modul m = 3 mm, Zahnbreite b = 10 mm, 20°-Normal-Verzahnung.
Abszisse. B: Lastwert in kg/mm² = P: (b · d_0) wobei b Zahnbreite und d_0 Teilkreisdurchmesser des Zahnradprüflings.
Ordinate. LW: Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch des Prüflings. N: Dauerstandfestigkeit von nicht gepeenten Zahnradprüflingen. G: Dauerstandfestigkeit von Zahnradprüflingen, die nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt wurden

und können auch Bild 7 entnommen werden. Es kommen darin alle drei Typen der genormten Almen-Test-Prüfplättchen vor. Für die Umrechnung sei auf Bild 8 verwiesen. Im Zusammenhang mit der Tabelle 1 unterstreicht *Straub* ausdrücklich, dass es sich bei seiner Empfehlung nur um Richtwerte für die Vorversuche handelt. Es ist auch zu beachten, dass zu jeder Festlegung einer Strahlintensität stets auch die Angabe der hierbei einzuhaltenden Flächenüberdeckung gehört. Was die in Tabelle 1 zusammengestellten Strahlintensitäten anbelangt, beziehen sie sich auf eine Flächenüberdeckung von 98 Prozent.

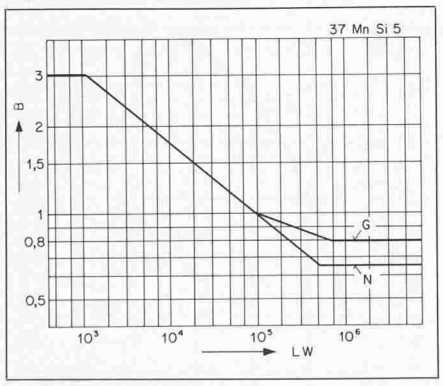

Bild 9. Lebenserwartungschrakteristik von vergüteten Zahnrädern. Das Diagramm beruht auf einer Reihenuntersuchung und vermittelt den Einfluss des Peenens auf die Dauerstandfestigkeit. Prüfung im Pulsator gemäss Anordnung Bild 3. Werkstoff der Zahnradprüflinge: 37 MnSi 5; Zähnezahl z = 34, Modul m = 3 mm, Zahnbreite b = 10 mm; 20°-Normalverzahnung
Abszisse. B: Lastwert in kg/mm² = P ä (b. d_0) wobei b Zahnbreite und d_0 Teilkreisdurchmesser des Zahnradprüflings. Ordinate. LW: Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch des Prüflings. Ordinate. LW: Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch des Prüflings. N: Dauerstandfestigkeit von nicht gepeenten Zahnradprüflingen G: Dauerstandfestigkeit von Zahnradprüflingen, die nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt wurden

Lebenserwartungscharakteristiken

Nach einem Bericht von *H. Winter* sind an der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau der *Techn. Hochschule München* Untersuchungen über den Einfluss des Shot-peenens durchgeführt worden [5]. Sie wurden mit im Einsatz gehärteten *und* mit vergüteten Zahnrädern gefahren, wobei jeweilen für die verschiedenen Belastungen die Anzahl Lastwechsel bis zum Bruch in einer Pulsometerprüfmaschine ermittelt wurden. Aufgrund der Ergebnisse wurden Lebenserwartungscharakteristiken erstellt. Bild 10 gibt den Einfluss des Peenens auf die Zahnfussfestigkeit von im Einsatz gehärteten Zahnrädern wieder, wobei auf der Abszisse die auf die Hauptabmessungen des Prüflings umgerechnete Schwellkraft der Prüfmaschine (Pulsator) aufgetragen wurde, gemäss der in der Legende angegebenen Berechnungsformel. Die hier untersuchten Zahnräder waren aus dem Werkstoff 20 MnCr 5 hergestellt. Die übrigen Daten und Abmessungen der Prüflinge können ebenfalls der Legende entnommen werden. Das Einspannen und die Belastung im Pulsator erfolgte gemäss der in Bild 3 wiedergegebenen Anordnung. In Bild 9 sind die Ergebnisse der Untersuchung an vergüteten Zahnrädern zusammengefasst, die aus dem Werkstoff 37 MnSi 5 hergestellt waren. Auch hier sind die Daten und Abmessungen der Legende zu entnehmen, während die allgemeine Darstellung der Charakteristik die gleiche ist wie in Bild 10.

Insgesamt sind hier *drei* verschiedene Lebenserwartungscharakteristiken für nach dem Shot-peening-Verfahren behandelte Zahnräder wiedergegeben worden. Bei einem Vergleich der Bilder 4, 9 und 10 drängt sich die Feststellung auf, dass durch das Peenen Erhöhungen der Belastungsfähigkeit erzielt wurden (Tabelle 1).

In Tabelle 1 sind verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt. Um sie auszunützen, wird nach Abschluss der Vorversuche zunächst eine *neue provisorische* Lebenserwartungscharakteristik erstellt. Anhand der sich daraus ergebenden Daten kann jetzt entschieden werden, ob neue abgeänderte Konstruktionsunterlagen (einschliesslich höher angesetzter Belastungsgrenzwerte) zugrunde gelegt werden sollen; unter Umständen muss eine Neuberechnung des Getriebes vorgenommen werden.

Tabelle 1. Erhöhung der Belastbarkeit nach dem Peenen

a) USA-Bericht über Untersuchungen an im Einsatz gehärteten Zahnrädern Charakteristik Bild 4:	
bei 10^7 Lastwechseln	ca. 50%
bei 10^6 Lastwechseln	>25%
b) Untersuchung der TH München an im Einsatz gehärteten Zahnrädern Charakteristik Bild 9:	
bei 10^7 Lastwechseln	ca. 80%
bei 10^6 Lastwechseln	>85%
c) Untersuchung der TH München an vergüteten Zahnrädern Charakteristik Bild 10	
bei 10^7 Lastwechseln	ca. 25%
bei 10^6 Lastwechseln	ca. 25%

Strahlintensität bei Sättigung

Grundsätzlich wird bei Anwendung des Shot-peening-Verfahrens eine möglichst weitgehende Gleichmässigkeit von Strahlintensität und Flächenüberdeckung angestrebt. Aus betriebstechnischen Gründen ist man gelegentlich gezwungen, für das Peenen eine Strahlmittelsorte und auch eine *Körnung* zu wählen, die es gestattet, den gewünschten Almen-Test-Wert zu erreichen, ohne dass hierbei die angestrebte Strahlintensität wesentlich überschritten werden kann, und dies auch nicht beim wesentlichen Überschreiten der vorgesehenen Strahlzeit. Im englischen Sprachgebrauch bezeichnet man diesen Wert als *«peening intensity at saturation»* oder auch als *«Almen strip saturation intensity»*. Diese treffenden Umschreibungen des Begriffes lassen sich am besten mit dem Ausdruck «Strahlintensität bei Sättigung» übersetzen.

Der Einfluss der Härte der zu behandelnden Werkstückoberfläche

Die Verwendung von im Einsatz gehärteten und von aus vergüteten Werkstoffen hergestellten Zahnrädern ist häufig. Auch sie müssen gepeent werden, wobei es sich vielfach um die Behandlung von Oberflächen handelt, die eine grosse Härte aufweisen (Werte bis zu 60 Rockwell «C» und gelegentlich sogar darüber). Aus der Praxis weiss man, dass auch bei der Behandlung von Werkstücken, die aus vergütetem Stahl gefertigt eine Oberflächenhärte von 60 Rockwell «C» aufwiesen, immer noch eine beachtliche Tiefenwirkung der aufprallenden Strahlmittelkörner festgestellt werden konnte, trotzdem das verwendete Stahlschrot selber eine wesentlich geringere Härte von nur etwa 48 bis 51 Rockwell «C» aufwies. So beträgt bei der Behandlung mit einer Strahlintensität nach Almen-Test C_2 = 0,25 mm die Dicke der durch die Hämmerwirkung beeinflussten Schicht immer noch 0,38 mm. Oder es sei der über ein hochbeanspruchtes Stirnräderpaar erfolgende Radantrieb von dieselelektrischen Güterzuglokomotiven erwähnt. Um den Beanspruchungen des sehr rauhen Betriebs gewachsen zu sein, weisen sowohl Zahnrad als Ritzel eine Oberflächenhärte von über 60 Rockwell «C» auf, die in manchen Fällen bis zu 62 Rockwell «C» betragen kann [6]. Ganz allgemein sehen die Pflichtenhefte der Bahnverwaltungen sowohl in den *USA* als auch in *Europa* für die Stirnradpaare solcher Antriebe (siehe Bild 11A und 11B) das Shot-peenen als letzte Bearbeitungsstufe vor.

Beim Strahlen von Stählen mit so grosser Oberflächenhärte lassen sich nach der Behandlung auch unter Benützung eines *Binokular-Lupenmikroskops* und bei einer 20- bis 30fachen Vergrösserung keine sichtbaren äusseren Spuren der Hämmerwirkung mehr feststellen. Es ist aber heute nachgewiesen, dass auch bei diesen hohen Oberflächenhärtegraden dennoch eine Erhöhung der Dauerstandfestigkeit erreicht wird.

Selbstverständlich beeinflusst auch die Materialhärte des zu behandelnden Werkstücks zusammen mit anderen Faktoren die Tiefenwirkung der Peening-Behandlung. Was die letzten anbelangt, sind zunächst die *Masse* und sodann die *Aufprallgeschwindigkeit der Strahlmittelkörner*, im weitern aber auch der *Aufprallwinkel* und die *Härte des Strahlmittels* zu nennen. Mit Ausnahme der Härte lassen sich diese Faktoren unter dem Begriff «Strahlintensität» zusammenfassen. Aufgrund eingehender Versuche sind die in Bild 12A und 12B wiedergegebenen Diagramme zu dieser Frage abgeleitet worden [7]. Den Kurven kann die Zonentiefe, in der die durch die Shot-peening-Behandlung erzeugten Druckspannungen wirksam sind, entnommen werden, und zwar in Funktion der angewendeten Strahlintensität. Als zusätzlicher Parameter dient die *Härte der Werkstückoberfläche*. Wie aus der Darstellung hervorgeht, werden bei weichen Stahlsorten wesentlich tiefere Materialschichten durch die Strahlwirkung erreicht als bei ausgesprochen harten Stahlqualitäten. Anderseits werden

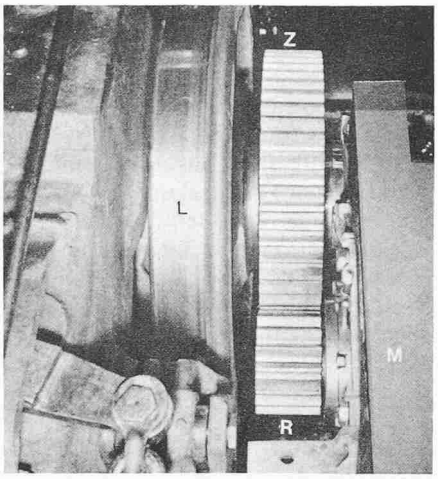

Bild 11A. Zahnrad-Antrieb einer Dieselelektrischen Lokomotive (gepeente Getrieberäder). M: Motorseite. L: Lokomotivrad. Z: Zahnrad. R: Ritzel

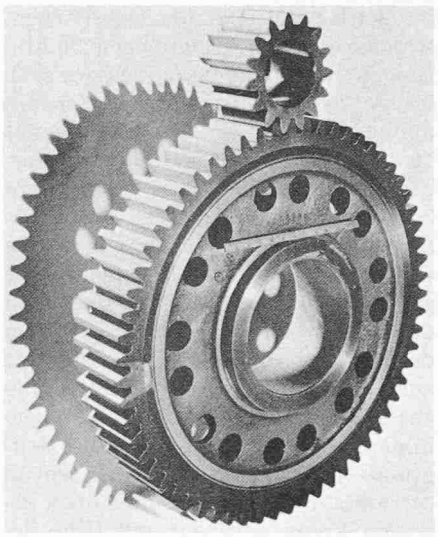

Bild 11B. Zahnrad und zugehöriges Zahnritzel (nach dem Peenen) für den Radantrieb einer dieselelektrischen Lokomotive (nach [6])

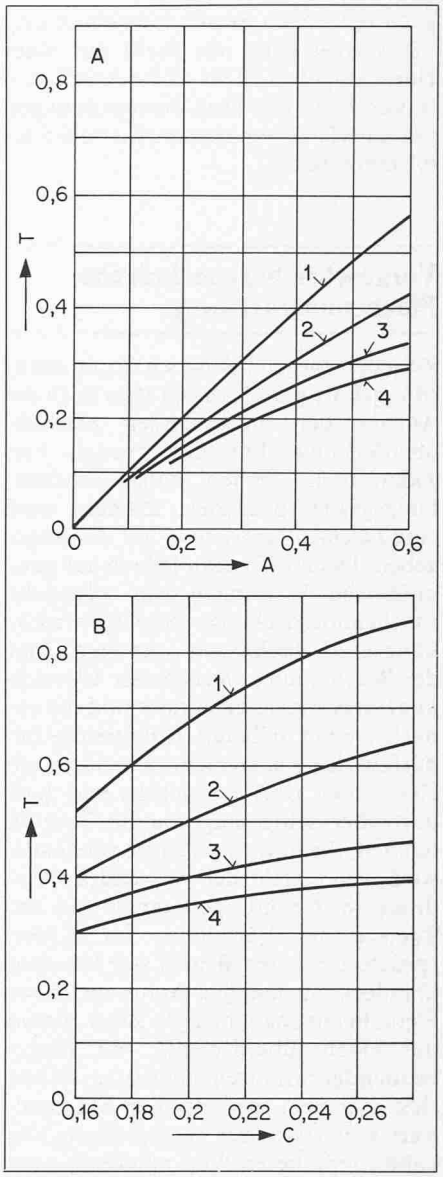

Bild 12A und B. Tiefe der Oberflächenschicht, in der beim Shot-peening-Verfahren die durch die Strahlbehandlung mit kugeligen Strahlmittelsorten auf Stahlbasis erzeugten Druckspannungen wirksam sind, aufgezeichnet in Funktion der angewendeten Strahlintensität und der Härte des Materials aus dem das Werkstück besteht. T: Tiefe der Oberflächenschicht in Millimeter, in der die erzeugten Druckspannungen wirksam sind. A: Strahlintensität, gemessen nach dem Almen-Test-Verfahren mittels Prüfplättchen Type A_2 (Diagramm A). C: Strahlintensität, gemessen nach dem Almen-Test-Verfahren mittels Prüfplättchen Type C_2 (Diagramm B). 1: Kurve für Werkstücke aus Stahl mit einer Härte von 30 Rockwell C. 2: Kurve für Werkstücke aus Stahl mit einer Härte von 40 nach Rockwell C. 3: Kurve für Werkstücke aus Stahl mit einer Härte von 50 nach Rockwell C. 4: Kurve für Werkstücke aus Stahl mit einer Härte von 60 nach Rockwell C.

auch bei hohen Strahlintensitäten und bei Werkstücken aus Stahl mit einer Härte von etwa 30 bis 40 Rockwell «C» in der Zone mit Druckvorspannungen nur eine Tiefe von maximal etwa 0,5 bis 0,8 mm erreicht.

Vorgeschriebene mehrfache Flächenüberdeckung

Zu jeder vorgeschriebenen Strahlintensität gehört grundsätzlich stets auch die Angabe der zugehörenden Flächenüberdeckung. Für das Peenen von Zahnrädern werden hohe Überdekkungsgrade spezifiziert. Zumeist wird eine *Flächenüberdeckung von 98%* angegeben. Doch trifft man jedoch auf ganz unübliche Weisungen wie «doppelte Flächenüberdeckung» oder «Überdekkungsgrad 5fach» usw., die man unter der Bezeichnung *«mehrfacher Überdekkungsgrad»* zusammenfasst und die zunächst einer näheren Erläuterung bedürfen, dies um so mehr, als es sich um eine in den USA entwickelte und auch dort eher selten angewandte Technik handelt, die in Europa kaum verwendet wird. Auch steht der verwendete Ausdruck im Grunde genommen mit der Theorie des Verfahrens im Widerspruch. Über den Begriff der Flächenüberdeckung hat der Autor an dieser Stelle bereits berichtet [8]. Zwar nimmt die Flächenüberdeckung mit länger werdender Strahlzeit ständig zu, nähert sich aber dem theoretischen Maximalwert von 100% nur asymptotisch und kann somit diesen Wert innerhalb einer praktisch anwendbaren Strahlzeit gar nicht erreichen. Unter der in einer Spezifikation angegebenen Bezeichnung «doppelte Flächenüberdeckung» ist somit eine Peening-Behandlung zu verstehen, bei der eine *doppelt so lange Strahlzeit* benötigt wird, als die für das Erreichen eines Überdeckungsgrades von etwa 98 bis 99% notwendig sein würde.

Man neigt, diese Vorschrift als *sehr hohen Sicherheitsfaktor* zusätzlich zu einer Strahlintensität bei Sättigung zu interpretieren. Bei der Behandlung von im Einsatz gehärteten und von aus vergütetem Stahl hergestellten Zahnrädern liegen jedoch ganz besondere Verhältnisse vor, die es gestatten, mit dieser Methode zusätzliche Vorteile herauszuholen, wie durch nachstehendes Beispiel gezeigt wird. Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, beträgt gemäss der Lebenserwartungscharakteristik (Bild 4) und unter der Annahme, dass das Getriebe mindestens eine Million Lastwechsel aushalten muss, eine Zunahme der Belastungsfähigkeit von über 25% gegenüber nicht gepeenten Rädern. Demgegenüber ergab eine Shot-peening-Behandlung mit siebenfacher Flächenüberdeckung, d. h. bei einer siebenmal so langen Strahlzeit als für eine normale Überdeckung von 98 bis 99% notwendig, sogar eine Erhöhung der Belastungsfähigkeit um 60%, wobei auch bei einer Million Lastwechsel kein einziger Prüfling zu Bruch gegangen war. Es ist auch festzuhalten, dass mit Hilfe des siebenfachen Überdeckungsgrades eine Verbesserung der Belastungsfähigkeit erreicht wurde, die über doppelt so gross war als eine Shot-peening-Behandlung mit der normalerweise üblichen Flächenüberdeckung von etwa 98%. Es sei noch erwähnt, dass die angewandte Strahlintensität an und für sich niedriger war, als dies gemäss der Tabelle 1 und in Funktion der Zahnfussbreite im allgemeinen üblich ist. Die Verbesserung der Ergebnisse durch Peenen mit einem mehrfachen Flächenüberdeckungsgrad lassen sich im Grunde genommen durch die in Bild 1 veranschaulichte Theorie des Shot-peening-Verfahrens nicht direkt erklären. Sie sind auch in der Literatur bisher nicht versucht worden.

Der Pitting-Effekt (Grübchenbildung)

Die Bezeichnung Pitting hat sich auch im deutschen Sprachgebiet für einen ganz bestimmten an den Zahnflanken im Betrieb auftretenden Oberflächenschaden eingebürgert und hat auch Eingang in die Literatur gefunden, wo auch der Ausdruck Pitting-Grenze Verwendung findet. Der Ausdruck stammt aus dem Englischen, wo das Wort pit Narben machen bedeutet und pitted mit pockennarbig zu übersetzen ist. Im *Getriebebau* wird die Bezeichnung Pitting wohl am besten mit Grübchenbildung gleichgesetzt. Die Erscheinung tritt an den *Zahnflanken* auf. Unterlagen über den Einfluss der Peening-Behandlung auf den Widerstand der Zahnoberfläche gegen das Aufteten der Grübchenbildung liegen nur wenige vor. Aufgrund neuerer Untersuchung scheint die Annahme berechtigt, dass unter gewissen Voraussetzungen mit Hilfe des Shot-peening-Verfahrens sich eine Verringerung der Gefahr von Pitting an den Zahnflanken erzielen lassen sollte. Dies gilt insbesondere für ungehärtete Zahnräder [9]. Im übrigen sei auf die einschlägige Literatur und vor allem auf die Disskusion dieser Frage durch *J. C. Straub* verwiesen [10].

Strahlmittel für das Peenen von Zahnrädern

Beim Peenen werden ganz besonders hohe Anforderungen an das Strahlmedium gestellt. Die zur Verfügung stehende Auswahl ist dementsprechend sehr klein. An erster Stelle steht die Forderung nach *einwandfreier Kugelform der Körner*. Eine möglichst *lange Standzeit* ist ebenfalls wichtig, denn bei Kornzerfall entstehen Bruchstücke, die unbedingt sofort aus dem Kreislauf entfernt werden müssen, da die beim Bruch entstehenden Kanten Anrisse auf der Werkstückoberfläche verursachen und so den Zweck des Peenens in Frage stellen würden. Der Strahl soll auch möglichst einheitlich aus Kügelchen von gleicher Grösse und gleicher kinetischer Energie bestehen, während Bruchstücke nur noch einen Teil der ursprünglichen Masse aufweisen. Die Shot-peening-Anlagen werden deshalb mit eigens für diesen Zweck entwickelten, nach dem *Windsichterprinzip* arbeitenden Apparaten ausgerüstet, die tatsächlich in der Lage sind, durch Kornzerfall entstandene Bruchstücke sofort aus dem Kreislauf zu entfernen, bevor sie wieder beschleunigt und auf das Werkstück geschleudert werden [11]. Den sehr hohen Anforderungen werden, da es sich hier um die Behandlung von Zahnrädern aus Stahl handelt, nur zwei Strahlmittelsorten gerecht:

1. Einwandfrei vorgerundeter Stahldrahtschnitt
2. und Stahlschrot erster Qualität

Abgesehen von seltenen Ausnahmefällen kommen für das Peenen von Zahnrädern aus Stahl Glasstrahlperlen nicht in Frage, und zwar wegen der grossen Oberflächenhärte der Werkstücke. In der Regel werden auf diesem Gebiet nur Strahlmedia auf Stahlbasis verwendet, wobei nur einwandfrei vorgerundeter Stahldrahtschnitt oder Stahlschrot erster Qualität zur Wahl stehen.

Im Neuzustand stellt ein *Drahtschnittkorn* einen *zylindrischen Körper* dar, dessen Länge gleich gross sein sollte wie der Durchmesser des Ausgangsmaterials. Im Neuzustand haben diese jedoch nicht nur scharfe Kanten, sondern, wie aus Bild 13A ersichtlich, überdies auch vom Schneidvorgang herrührende Brauen und Deformationen. Sie sind deshalb für das Shot-peenen vollständig ungeeignet, Anrisse an der Oberfläche der Werkstücke wären die unvermeidliche Folge, was den Zweck des Verfahrens in Frage stellen würde. Drahtschnitt kann deshalb zum Peenen nur verwendet werden, nachdem es vorher in separaten Anlagen konditioniert worden ist, bis alle Körner einwandfreie Kugelform angenommen haben (siehe Bild 13B). Dabei geht zwar ein Teil der totalen Standzeit (etwa 10%) verloren. Dies muss aber in Kauf genommen werden, denn nur so kann das Peenen mit Sicherheit erfolgreich durchgeführt werden. Dafür haben bei vorgerundetem Drahtschnitt sämtliche Körner praktisch fast denselben Durchmesser. Hier sind die Voraussetzungen für einen homogenen Strahl am ehesten erfüllt.

Stahlschrot erster Qualität ist schon

vom Herstellungsverfahren her kugelförmig, doch fällt auch bei sorgfältiger Aussiebung stets ein Gemisch verschiedener Korngrössen an. Die in den üblichen Normen vorgeschriebenen Klassierungen werden zumeist als für das Shot-peenen zu wenig präzis angesehen. Man verlangt *Spezialaussiebungen* mit wesentlich engeren Toleranzen. Spezifikationen hierfür bestehen jedoch nur in den USA [12].

Anforderungen an die Anlagetechnik

Das Peenen stellt eine *Präzisionsbehandlung der Feinbearbeitungstechnik* dar. Die angestrebte Erhöhung der Dauerstandfestigkeit kann nur erreicht werden, wenn nicht nur die Strahlintensität und der Flächenüberdeckungsgrad, sondern auch sämtliche übrigen Parameter peinlich genau eingehalten werden. Für die Durchführung im Betrieb ergeben sich sodann aus dieser Notwendigkeit und auch aus den Eigentümlichkeiten des Peening-Verfahrens *besondere Anforderungen* an die zu verwendenden Anlagen. Das Shot-peenen von Werkstücken lässt sich deshalb in Strahlanlagen, wie sie für die verschiedensten Zwecke gebaut werden, nicht durchführen. Dies gilt ganz besonders auch für Zahnräder jeder Art. Die angestrebte grosse Verlängerung der Dauerstandfestigkeit kann nur erreicht werden, wenn eigens für diesen Zweck gebaute und ausgerüstete, den Anforderungen des Peening-Verfahrens somit genau angepasste Anlagen, verwendet werden. Diese müssen unter anderem mit mechanischen Vorrichtungen für sämtliche Translationsbewegungen ausgerüstet sein, und zwar nicht nur für den Transport und alle Drehbewegungen der Werkstücke, sondern auch für eventuelle Bewegungsabläufe der Schleuderräder bzw. der Strahldüsen bei nach dem Druckluftsystem arbeitenden Ausrüstungen. Nur auf diesem Wege kann die erforderliche Gleichmässigkeit der Peening-Behandlung über ganze Flächenabschnitte erreicht werden. Hierzu kommt noch die wichtige Forderung nach *einwandfreier Reproduzierbarkeit der Strahlbehandlung* usw. hinzu.

Über die Anforderungen an die Anlagetechnik beim Shot-peening-Verfahren und die damit zusammenhängenden Probleme hat der Autor an dieser Stelle bereits ausführlich berichtet [13]. Dort wurden auch die Arbeitsweise der Schleuderräder sowie die Unterschiede zwischen den verschiedenen nach dem Druckluftsystem arbeitenden Strahlanlagen besprochen. Entsprechend der Vielfalt der zu lösenden Probleme werden Anlagen für das Peenen von Zahnrädern zumeist als für genau umschriebene Einzelfälle bestimmte Sonderausführungen gebaut. Im nachfolgenden wird versucht, eine kurze Übersicht über verschiedene Lösungen zu vermitteln. Hierzu musste eine Auswahl getroffen werden, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt!

Peenen von Zahnrädern in nach dem Druckluftsystem arbeitenden Strahlkabinen

Für die Behandlung von Zahnrädern bieten Anlagen, in denen die Beschleunigung des Strahlmediums mit Druckluft erfolgt, verschiedene wichtige Vorteile. Vor allem lassen sich die Strahldüsen so ausrichten, dass die vollständig gleichartige Behandlung beider Zahnflanken sowie das intensive Peenen beider Ausrundungen am Zahnfuss (ausgerundete Übergänge von Zahngrund zu Zahnflanken) gewährleistet wird. Nur wo grosse Serien gleichartiger Stücke gepeent werden müssen, gibt man wegen der erforderlichen Produktionsleistung mit Schleuderrädern bestückten Maschinen den Vorzug. In Kabinen, die nach dem Druckluftsystem arbeiten, können hingegen Zahnräder mit einer viel grösseren Varietät was Abmessungen und Formen anbelangt, gepeent werden. Aus den in [13] dargelegten Gründen gibt man den nach dem *Gravitationssystem* arbeitenden Druckluft-Peen-Kabinen den Vorzug. In [13] sind auch zwei Beispiele für das Peenen von Zahnrädern im Bilde gezeigt, die eindrücklich die Flexibilität des Druckluftsystems beleuchten (Bild 15 und 17A in [13]).

In vielen Fällen können auch kleine Serien gleichartiger Ritzel oder kleinerer Zahnräder in einem Arbeitsgang gepeent werden (Bild 14). Die hier gezeigte Strahlkabine ist speziell für das Arbeitsgebiet Shot-peening ausgelegt und mit insgesamt fünf nach dem Gravitationssystem arbeitenden Injektorstrahlpistolen ausgerüstet.

Bei geöffneter Vordertüre vermittelt das Bild einen Blick ins Innere, wo in einer drehbankartigen Vorrichtung das eingespannte, aus 30 Zahnritzeln bestehende Paket sichtbar ist, das von einem aussen angeordneten Antrieb eine Drehbewegung um die Längsachse erhält. Vier der insgesamt fünf Pistolen sind zu einer Gruppe zusammengefasst und führen gemeinsam mit Hilfe einer mechanisch angetriebenen Vorrichtung eine hin- und hergehende Translationsbewegung parallel zur Längsachse des sich drehenden Ritzelpaketes aus. Die vier Düsen sind so ausgerichtet, dass sowohl die beiden Zahnflanken als auch der Zahngrund einwandfrei und gleichmässig beaufschlagt sind. Die fünfte Strahlpistole ist abgeschaltet und deshalb auch im Bild nicht sichtbar.

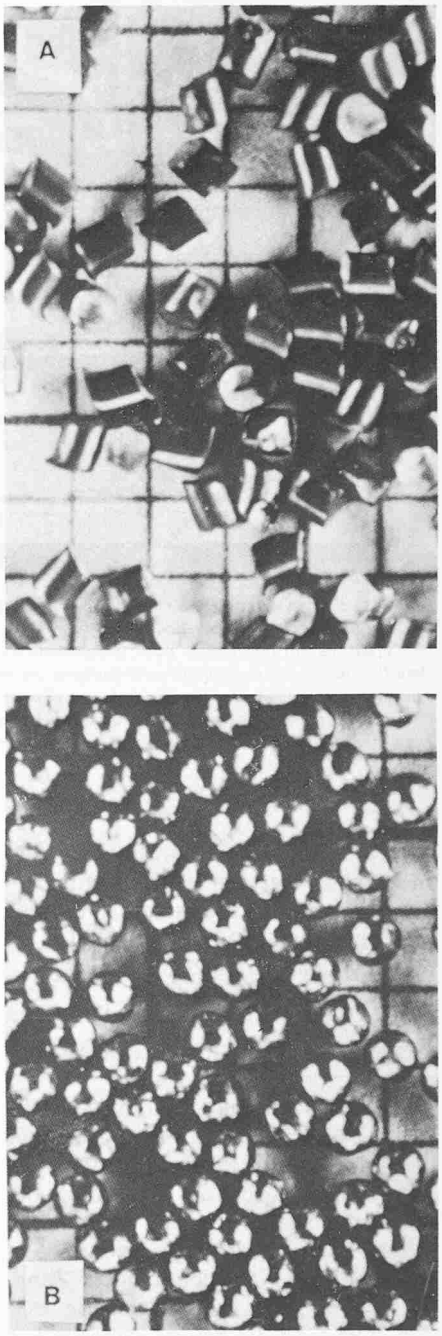

Bild 13A und B. Stahldrahtschnitt (Drahtkorn) aus patentiert gezogenem Stahldraht von 0,6 mm Durchmesser und mit einer Härte von 48 bis 52 Rockwell C. Vergrösserung 10fach.
A: Neuzustand. Mit den vom Schneidvorgang herrührenden, deutlich sichtbaren scharfen Kanten und Brauen ist das Material für das Shot-peening-Verfahren unbrauchbar
B: in einer speziellen Anlage vorgerundeter Drahtschnitt. Die Körner haben nunmehr fast vollkommene Kugelform angenommen. Auffallend ist die Gleichmässigkeit des Korndurchmessers. Photo: Georg Fischer AG, Schaffhausen

Zur Anlage gehört auch eine sehr reichhaltig ausgestattete elektrische Schaltausrüstung. Sämtliche Parameter können vorgewählt werden. Das Peening läuft nach dem Einschalten selbsttätig gemäss dem vorgewählten Arbeitsprogramm ab, wobei nicht nur die Strahlzeit aller fünf Düsen, sondern auch die Geschwindigkeiten sämtlicher Arbeitsabläufe und Bewegungen einzeln vorgewählt werden können. Die an den Programmreglern eingestellten Parame-

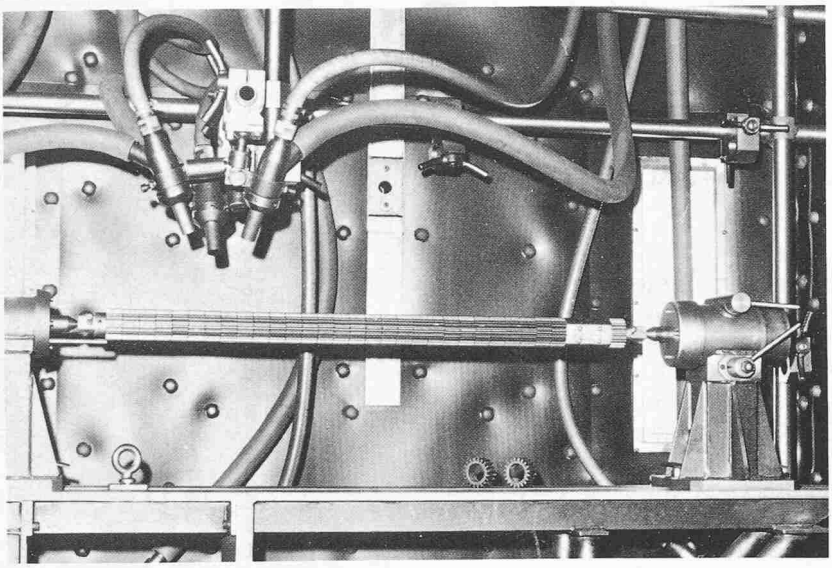

Bild 14. Peenen eines Pakets von 30 Zahnritzeln gleichzeitig in einer nach dem Druckluftsystem arbeitenden, mit insgesamt fünf verstellbaren Injektor-Strahlpistolen ausgerüsteten Shot-peening-Kabine. Strahlmittel-Zuführung mit Becherwerk nach Gravitationssystem. Schaltpult mit Programmvorwahl für alle wesentlichen Parameter und sodann mit vollständigem, automatischem Ablauf der Peening-Behandlung eines ganzen Pakets, wobei die Injektor-Strahlpistolen en bloc eine Translationsbewegung entlang dem in eine drehbankähnliche Vorrichtung eingespannten und sich um die Längsachse drehenden Zahnritzel-Paket ausführen. Blick ins Innere der Kabine bei geöffneter Vordertüre. Photo: Société Bugatti S. A. Molsheim/France.

ter werden registriert, so dass im Störungsfalle oder bei Betriebsunterbrüchen trotzdem die Gesamtbehandlung ordnungsgemäss abläuft, sobald die Störung behoben worden ist.

Erwägungen allgemeiner Natur

Der Zweck der Shot-peening-Behandlung ist es, die *Lebensdauererwartung* der behandelten Zahnräder *heraufzusetzen*, was durch die Erhöhung der Zahnbruchfestigkeit am Zahnfuss durch Peenen des Zahngrundes und der Ausrundungen zu den beiden Zahnflanken möglich ist. Gleichzeitig werden aber auch die beiden Zahnflanken mitgestrahlt, um so die Gefahr der Grübchenbildung (Pitting-Effekt) zu verringern. Somit muss der ganze Zahnkranz einer einheitlichen Peening-Behandlung unterzogen werden, während alle übrigen Flächen nicht gestrahlt werden. Gegebenheiten, die einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl des Systems und auf die Ausstattung der Peening-Anlagen ausüben. Der aus der mit Druckluft betriebenen Strahldüse austretende Strahl ist sehr schlank und hat eine konzentrierte, verhältnismässig kleine Auftrefffläche von nur wenigen Zentimetern Durchmesser. Betrachtet man die oben beschriebene Strahlkabine, so ergibt sich eine fast vollständige Ausnützung der zur Verfügung stehenden Strahlleistung der vier Druckluftstrahldüsen. Auch wenn anstelle der Ritzel ein entsprechend grosses Paket Stirnräder eingespannt wird, so ergibt sich trotzdem eine einwandfreie Beaufschlagung der Zahnkränze sämtlicher Räder, während die Stirnseiten überhaupt nicht gestrahlt werden, was an und für sich erwünscht ist. Die Produktionskapazität hingegen ist bei Anlagen nach dem Druckluftsystem verhältnismässig beschränkt.

Ganz andere Verhältnisse liegen hingegen bei mit *Schleuderrädern* bestückten Anlagen vor. Zwar kann durch Verstellen des Einlaufstückes das austretende Strahlenbündel genau auf die zu behandelnden Flächen gerichtet werden, jedoch erfährt der Schleuderstrahl beim Austritt aus dem Rad eine starke Auffächerung (siehe Bild 1 und 3 in [13]), was ein entsprechend langgestrecktes Strahlbild zur Folge hat. Um die beim Schleuderrad zur Verfügung stehende grosse Strahlleistung einigermassen auszunützen, müssen Maschinen dieser Bauart mit *mechanischen Transporteinrichtungen* ausgerüstet sein, die nicht nur die zu behandelnden Werkstücke durch die Strahlzonen der ausgefächerten Schleuderstrahlen zu führen haben, sondern gleichzeitig eine gleichmässige und allseitige Peening-Behandlung des ganzen Zahnkranzes sicher stellen müssen. Da nicht nur die eigentlichen Werkstücke, sondern auch die Hilfseinrichtungen die Strahlzone der Maschine durchlaufen, sind die letzten dort vor der Abnützung durch rückprallende Strahlmittelkörner zu schützen, sei es durch Verwendung verschleissfester Materialien oder durch entsprechende Schutzabdeckungen. Von der Bewältigung dieser Probleme durch den Konstrukteur hängt die Wirtschaftlichkeit dieser Maschinen wesentlich ab.

In Anbetracht der verlangten hohen Leistungen werden solche Anlagen im allgemeinen mit zwei Schleuderrädern ausgerüstet. Der Strahlmitteldurchsatz dürfte in solchen Fällen etwa 500 bis 600 kg in der Minute betragen. Selbstverständlich spielt auch die Bauart und die Grösse der verwendeten Schleuderräder auch eine Rolle. Ausführungen mit nur einem bzw. mit drei Schleuderrädern sind eher selten. Mit Schleuderrädern bestückte Anlagen zum Peenen von Zahnrädern werden in Anbetracht der ihnen eigenen hohen Produktionskapazität in erster Linie von der *Automobilindustrie und ihren Zulieferbetrieben* benötigt (PKWs und Lastwagen) aber auch z. B. für die Herstellung von Baggern und anderer schwerer Baumaschinen, für Landmaschinen, für Panzer und geländegängige Wagen usw.

Vor allem die Automobilindustrie verlangt Maschinen, die in der Lage sein müssen, sehr grosse Stückzahlen gleicher oder zum mindesten gleichartiger Zahnräder zu behandeln. Im weiteren werden Anlagen gewünscht, die in *Fliessbänder* oder in *Transfer-Strassen* eingegliedert werden können. Leistungsfähige, mit Schleuderrädern bestückte Shot-peening-Anlagen können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Sie unterscheiden sich danach, wie das Problem des Transportes der Zahnräder durch die Strahlzone gelöst ist:

1) Mit Schleuderrädern ausgerüstete Shot-peening-Maschinen, bei denen der Transport der Werkstücke durch die Strahlzone mit Satellitendrehtischen erfolgt;
2) Mit Schleuderrädern bestückte Durchlaufmaschinen.

Bild 15 zeigt ein repräsentatives Beispiel aus dem Getriebebau in der Automobilindustrie. Es handelt sich um ein 4-Gang-Vollsynchrongetriebe. Bei ab-

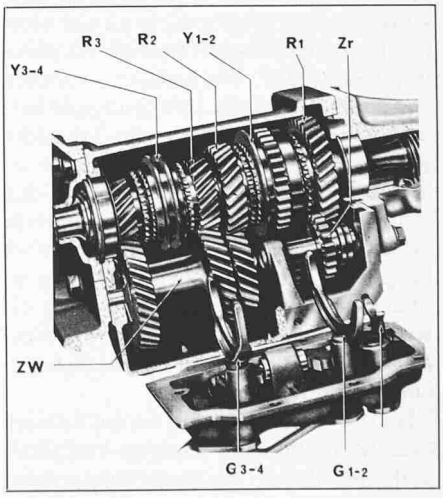

Bild 15. Blick in das Innere eines Ford-4-Gang-Vollsynchron-PKW-Getriebes
R_1, R_2, R_3: Zahnräder für den ersten, zweiten und dritten Gang. Stirnzahnräder mit Schräg-Verzahnung). Z_r: Zahnrad für Rückwärtsfahrt. ZW: Zahnradvorgelegewelle. Y_{1-2} und Y_{3-4}: Synchronisierung zwischen 1. und 2. bzw. zwischen 3. und 4. Gang. G_{1-2} und G_{3-4}: Schaltgabeln, die eine für Übergang vom 1. zum 2. und die andere für den Übergang vom 3. zum 4. Gang.
Photo: Ford-Werke AG. Köln-Niehl. bzw. Ford Motor Comp. (Switzerland) SA Zürich

genommenem Gehäusedeckel ist das Innere mit seinen zahlreichen Stirnrädern, den Synchronisiereinrichtungen sowie der Zahnradvorgelegewelle zu sehen. Das Beispiel wurde ausgewählt, weil in diesem Fall auch Angaben über das Shot-peening-Verfahren gemacht werden können. Das Getriebe wurde seinerzeit für den Ford-PKW Type 17 M konstruiert, wobei jedoch für kein einziges der Bauelemente oder Zahnräder Shot-peening vorgesehen war. Im praktischen Betrieb traten jedoch nach einer gewissen Zeit Schwierigkeiten mit dem neuen Synchrongetriebe auf, sei es durch Brüche an Zahnrädern, sei es durch vorzeitige Abnützungserscheinungen. Durch Peenen der gefährdeten Bauelemente konnten diese Schwierigkeiten behoben werden. Weitere Untersuchungen und Versuche führten sodann zum Entschluss, sämtliche Zahnräder, Vorgelegewelle usw. zu peenen, wobei verschiedene Behandlungsspezifikationen geändert wurden. Dies ergab eine wesentlich höhere Belastbarkeit des Getriebes, das sodann ohne Schwierigkeiten in die grössere Wagentype 20 M eingebaut werden konnte.

Peenen mittels Schleuderradmaschinen mit Satellitendrehtischen

Anlagen für das Peenen von Zahnrädern sind entsprechend der Verschiedenheit der zu lösenden Probleme zumeist als Sonderausführung zu bauen. Dies gilt auch für die hier zu besprechenden mit Satellitendrehtischen ausgerüsteten Peening-Maschinen. Am gesamten Zahnkranz müssen an allen Zähnen Zahngrund und Zahnflanken einwandfrei und gleichförmig gepeent werden. Wie aus Bild 16 A hervorgeht, muss somit für die Behandlung von Kegelrädern der Schleuderstrahl von oben einfallen und deshalb das Schleuderrad auf dem Dach der Maschine aufgebaut werden. Für die Behandlung von Stirnrädern hingegen ist es aus den gleichen Gründen erforderlich, das Schleuderrad an der Seitenwand der Strahlmaschine anzuordnen (Bild 16 B). Wegen der Auffächerung des horizontal einfallenden Schleuderstrahls kann auf jedem der Satellitentische ein ganzes Paket Stirnräder gleichzeitig gepeent werden, das eigens auf einem in Tischmitte angeordneten Dorn aufgesteckt wird. Bei solchen mit Satellitendrehtischen ausgerüsteten Maschinen ist das Problem des Verschleissschutzes auf verhältnismässig einfachem Wege zu lösen, was für beide dargestellten Schleuderradanordnungen gilt.

Die Anlage in Bild 16 C ist für das Peenen von Zahnrädern mit Stirnverzahnung und von Kegelrädern ausgelegt, wobei die in den Bildern 16 A und 16 B dargelegten Forderungen über die gegenseitige Lage von Schleuderrad und Werkstück erfüllt sind. Dafür ist die Maschine mit zwei Schleuderrädern ausgerüstet, die jedoch nicht gleichzeitig, sondern nur abwechselnd in Betrieb genommen werden. Der Haupttisch der Maschine ist aber mittels vertikaler Zwischenwände in vier Sektoren unterteilt. In der Mitte jedes Sektors befindet sich einer der insgesamt vier Satellitentische. Der eigentliche Haupttisch dreht sich schrittweise um jeweils 90°. Es ergeben sich so vier Arbeitsstationen, an denen der Haupttisch stillsteht. Vorne steht auch der Satellitentisch still, während das bereits gepeente Werkstück durch die automatische Ent- und Beladeeinrichtung weggenommen wird, die sodann ein neues Werkstück auflegt. An der darauffolgenden Station befindet sich das auf dem Dach aufgebaute, für das Peenen von Kegelrädern bestimmte Schleuderrad, während an der nächsten Station das für die Behandlung von Stirnräderpaketen bestimmte Rad an der Hinterwand der Maschine montiert ist. Im Bild ist vorn die automatische Beschickungseinrichtung gut zu sehen. Sie besteht aus einem Plattenbandkonveyor mit schrittweisem Vorschub und einer in Querrichtung dazu arbeitenden Greifereinrichtung, welche das bereits gepeente Werkstück vom vorne stehenden Satellitentisch wegnimmt und auf dem Plattenkonveyor abstellt und sodann von dem einen Schritt weitergerückten Plattenkonveyor das nächste Werkstück wegnimmt und auf den leeren Satellitentisch ablegt. Mit dieser Anlage wird nicht eine Mischproduktion behandelt, sondern es werden jeweils grössere Serien gleichartiger Zahnräder gepeent, wobei das auf dem Dach montierte oder das an der Hinterwand angeordnete Schleuderrad (Bild 16 B) in Betrieb genommen wird. Eine Verriegelung verhindert das gleichzeitige Einschalten der beiden Räder.

Die in Bild 17 A gezeigte Satelliten-Drehtisch-Maschine ist mit zwei auf dem Dach der Anlage aufgebauten Schleuderrädern von je 30 PS Antriebsleistung ausgerüstet, die zusammen bis zu 500–600 kg Stahlschrot auf die zu behandelnden Werkstücke abzuwerfen in der Lage sind. Die Tische haben einen Durchmesser von je 400 mm. Es handelt sich hier um eine sehr leistungsfähige Maschine, die in einer grösseren europäischen Automobilfabrik für das Peenen von Getriebeteilen im Einsatz steht. Erwähnenswert ist auch, dass die Anlage direkt auf dem Werkstattboden aufgestellt wird und somit keinen Fundamentaushub benötigt. Die Arbeitsweise ist in Bild 17 B veranschaulicht. Es handelt sich hier um eine Betriebsaufnahme aus einem grossen Automobilwerk in den USA. Die dort stehende Satelliten-Drehtisch-Maschine von

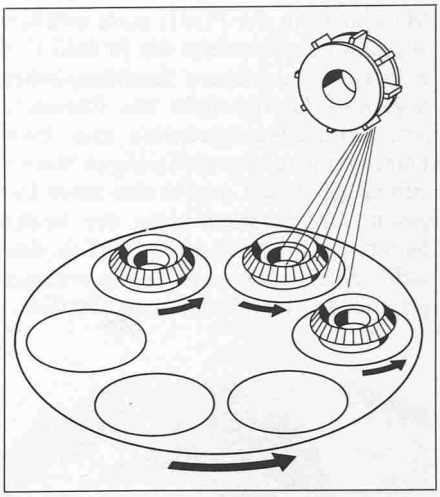

Bild 16A Die Behandlung von Kegelrädern nach dem Shot-peening-Verfahren auf mit Satellitendrehtischen ausgerüsteten Schleuderradmaschinen

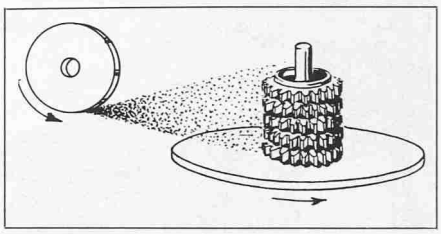

Bild 16B. Das Shot-peenen von Zahnrädern mit Stirnverzahnung auf den Satellitendrehtischen einer mit einem Schleuderrad ausgerüsteten Drehtischmaschine, wobei die Stirnräder in Paketen auf die im Drehzentrum der Satellitentische montierten Dorne aufgesteckt werden

grundsätzlich gleicher Bauart hat jedoch etwas grössere Abmessungen und zählt sogar 18 Satellitentische bei sonst gleicher Schleuderradleistung. Wie ferner aus Bild 17 C ersichtlich, befindet sich an der Rückseite der Maschine eine zusätzliche Bedienungsstation, an der ein zweiter Arbeiter die Werkstücke wendet, während das Be- und Entladen der Tische vorne erfolgt. Sowohl der Haupttisch als auch die Satellitendrehtische sind mit dicken Gummimatten abgedeckt, die als Verschleissschutz dienen. Die im Bild sichtbaren Löcher in den Gummiplatten dienen für das Ablaufen des Strahlmittels. Auf dem Bild ist eindeutig zu erkennen, dass in der Anlage nicht etwa Kegelräder, sondern vor allem Ritzelwellen, Zahnrad-Vorgelegewellen und ähnliche Getriebeteile behandelt werden. Die Verwendung von mit Satellitendrehtischen ausgerüsteten Schleuderradmaschinen für das Peenen solcher Teile hat einen gewichtigen betrieblichen Nachteil, auf den bei der Durchführung der Arbeiten sorgfältig geachtet werden muss, ist doch eine gleichmässige Behandlung aller Oberflächen beim Peening-Verfahren Voraussetzung des Erfolges. Dies gilt ganz allgemein für alle Parameter und vor allem für die Strahlintensität und den Flächenüberdeckungsgrad. Aber gerade diese Forderungen lassen sich auf solchen Satelliten-Drehtisch-

Maschinen in der Praxis nicht erfüllen. Werden beispielsweise die in Bild 17 A auf den verschiedenen Satellitentischen liegenden Getriebeteile wie Ritzelwellen, Zahnradvorlegewellen usw. beim Durchgang auf der rückseitigen Station einmal gewendet, ergibt dies zwar insgesamt ein Strahlen jeder der beiden Seiten. Es ist jedoch offensichtlich, dass sich eine auch nur einigermassen gleichartige Beaufschlagung sämtlicher Zahnoberflächen auf diese Weise gar nicht erreichen lässt. Dies gilt in noch viel höherem Masse für die auf einem der Satellitentische liegenden Stirnräder. Was die Ritzelwellen und Zahnradvorgelege anbelangt, lässt sich durch einen zweiten zusätzlichen Durchgang durch die Maschine mit je einem zusätzlichen Wenden übers Kreuz vorn und hinten zwar eine wesentliche Verbesserung des Resultates erzielen, nicht jedoch die eigentlich verlangte gleichmässige Bestrahlung des ganzen Zahnkranzes, was Strahlintensität und Flächenüberdeckung anbelangt. Somit lassen sich solche Teile wie Vorgelegewellen usw. auf mit Satelliten-Drehtisch-Maschinen nur einer Peening-Behandlung unterziehen, wenn «Strahlintensitäten bei Sättigung» zur Anwendung gelangen. Strahlmittelsorte und Körnung müssen dementsprechend gewählt werden, sollen auch an den überstrahlten Stellen und Flächen die vorgeschriebenen Almen-Test-Werte nicht wesentlich überschritten werden. Bei der Verwendung von mit Satellitentischen ausgerüsteten Peening-Maschinen ist somit die Betriebsführung mit zusätzlichen Auflagen und Einschränkungen verbunden. Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass für das Shot-peening-Verfahren bestimmte Satelliten-Drehtisch-Maschinen im allgemeinen mit Schrittschaltung arbeiten. Dabei hält die Schaltausrüstung den Haupttisch an, während die beiden sich unter den Schleuderrädern befindenden Satellitentische im Schleuderstrahl der beiden Räder weiterrotieren. Nach Ablauf der eingestellten Strahlzeit läuft der Haupttisch einen Schritt weiter und das nächste Satellitenpaar wird in gleicher Art und Weise behandelt.

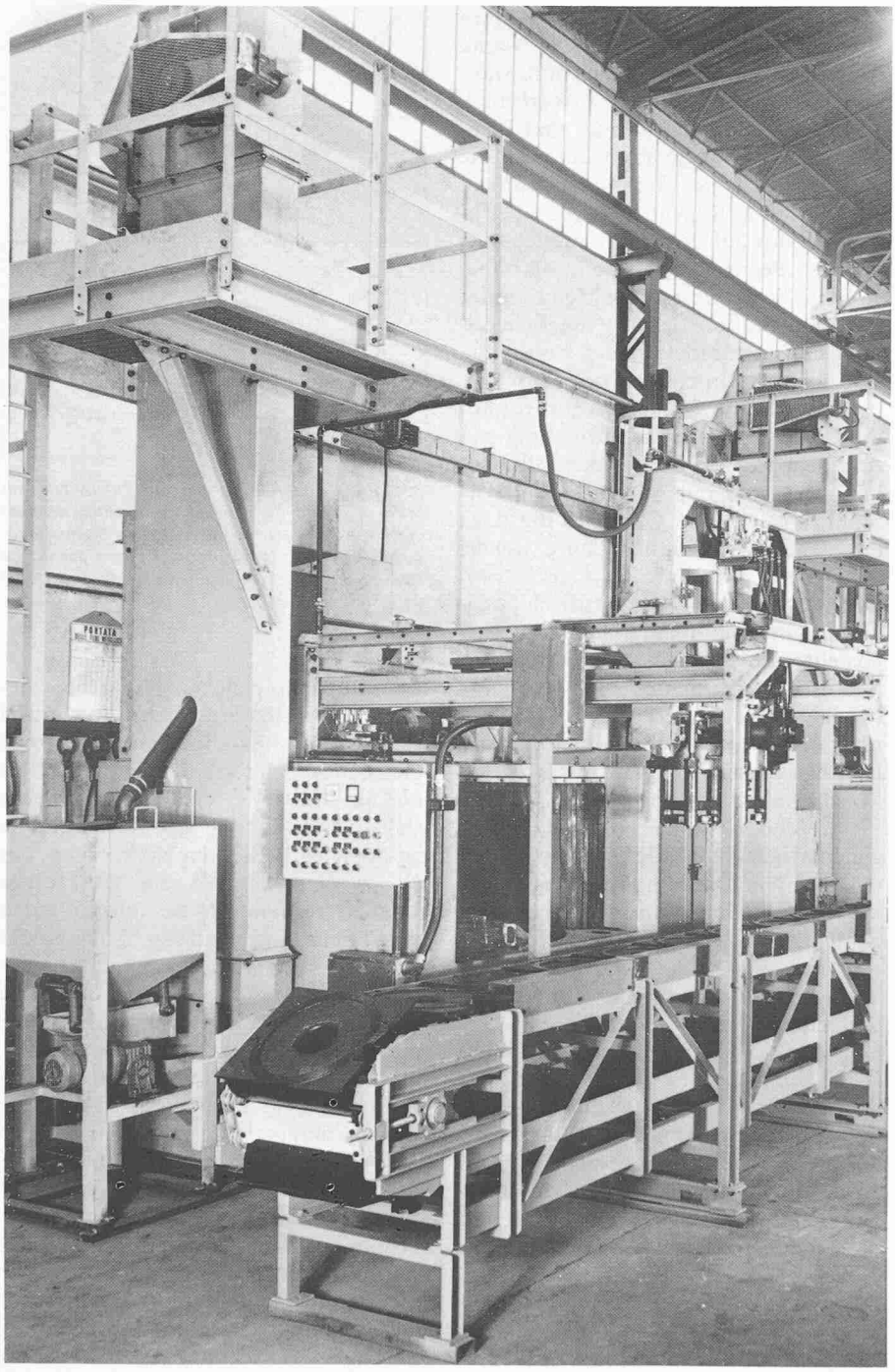

Bild 16C. Mit vier Satellitendrehtischen ausgerüstete Anlage zum Peenen von Zahnrädern mit Stirnverzahnung sowie von Kegelzahnrädern. Zwei Schleuderräder, von denen das eine, gemäss Bild 16A, auf dem Dach des Maschinengehäuses aufgebaut, für die Behandlung von Kegelrädern verwendet wird, während das andere an der nächstfolgenden Station an der Rückwand aussen angeordnete zum Peenen von Stirnrädern in Paketen gemäss Bild 16B verwendet wird. Die Werkstücke werden in Serien gleichartiger Stücke durchgeschleust, wobei jeweilen nur eines der beiden Schleuderräder im Betrieb ist. Automatische Beladeeinrichtung aus Platten-Bandkonveyor mit schrittweisem Vorschub und einer in Querrichtung dazu arbeitenden Greifereinrichtung, welche die fertig gepeenten Werkstücke vom vorne stehenden Satellitendrehtisch abnimmt und zum Weitertransport auf den Platten-Bandkonveyor ablegt. Der Platten-Bandkonveyor rückt sodann einen Schritt weiter. Der Greifer hebt danach ein noch nicht behandeltes Werkstück ab und legt es auf den leeren, vorne stehenden Satellitendrehtisch ab.
Photo: Pangborn Europe S. p. A. The Carborundum Comp. Carrono Pertusella/Italien

Durchlaufmaschinen für das Peenen von Stirnrädern, Getriebewellen und ähnlicher Teile.

Wie aus Bild 16 A bzw. dem Strahlschema in Bild 17 B hervorgeht, eignen sich Satellitendrehtische vor allem für das Peenen von Kegelrädern. Für die Behandlung von Zahnritzelwellen, Zahnradvorgelegewellen usw. gibt man hingegen den sogenannten Durchlaufmaschinen den Vorzug, weil hier der Zahnkranz eine Drehbewegung um seine Achse erhält und somit eine gleichmässige Beaufschlagung aller Zähne einschliesslich Zahngrund und Zahnflanken einwandfrei gewährleistet ist.
Bild 18 A zeigt eine mit zwei Schleuderrädern ausgerüstete Maschine dieser Bauart, während Bild 18 B das hier angewandte Transportprinzip veranschaulicht und zwar am Beispiel eines auf einer Hilfsvorrichtung aufgesteckten Pakets Stirnräder. Die beiden Schleuderradeinheiten sind auf dem Dach der Maschine aufgebaut; ihre Schleuderstrahlen konvergieren gegen einander, sind aber beide in der Längsrichtung der Maschine gerichtet. Um die Transporteinrichtung zu veranschaulichen, zeigt Bild 19 die hell beleuchtete Beladestation. Die beiden durch Traversen miteinander verbundenen Transportketten laufen entlang den Seitenwänden durch die Maschine

Bild 17A. Mit zwei auf dem Dach des Maschinengehäuses montierten Schleuderrädern sowie mit 16 Satelliten-Drehtischen ausgerüstete Tischmaschine für das Peenen von für PKW und LKW bestimmten Getriebeteilen. Jedes der beiden Schleuderräder wird von einem separaten Becherwerk gespiesen. Fundamentlose Ausführung. Photo: Graber + Wening AG., Neftenbach

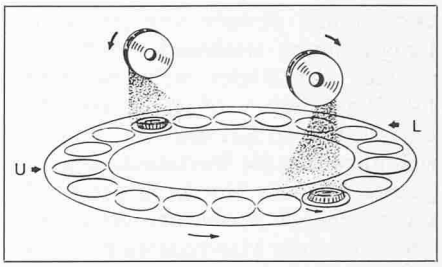

Bild 17B. Prinzipschema eines grossen Satellitendrehtisches für das Peenen von PKW-Getriebeteilen und Zahnrädern, ausgerüstet mit zwei Schleuderrädern von je 25 PS Leistung sowie mit insgesamt 18 Satellitendrehtischen.
L: Beladen und Entladen auf der Vorderseite der Maschine. U: das Wenden der Stücke erfolgt auf der Rückseite der Drehtischmaschine
Aufnahme aus einem amerikanischen Automobilwerk

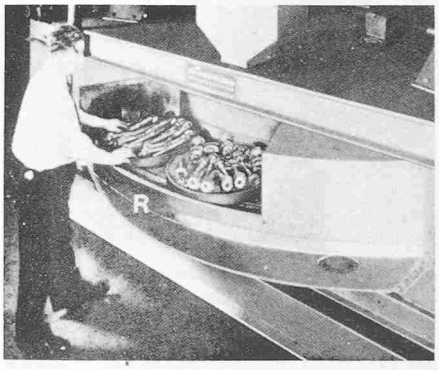

Bild 17C. Hilfsstation auf der Rückseite der Anlage gemäss Bild 17A für das Wenden der Werkstücke nach dem Durchgang unter dem ersten Schleuderrad. Bodenebene Aufstellung ohne Fundamentgrube.
R: Hilfsstation auf der Rückseite. Die Grösse der Drehtischmaschine kann von den an der rückwärtigen Wendestation sichtbaren Bedienungsmann abgeschätzt werden.
(Photo: Wheelabrator Corp. Mishawaka, Indiana, USA)

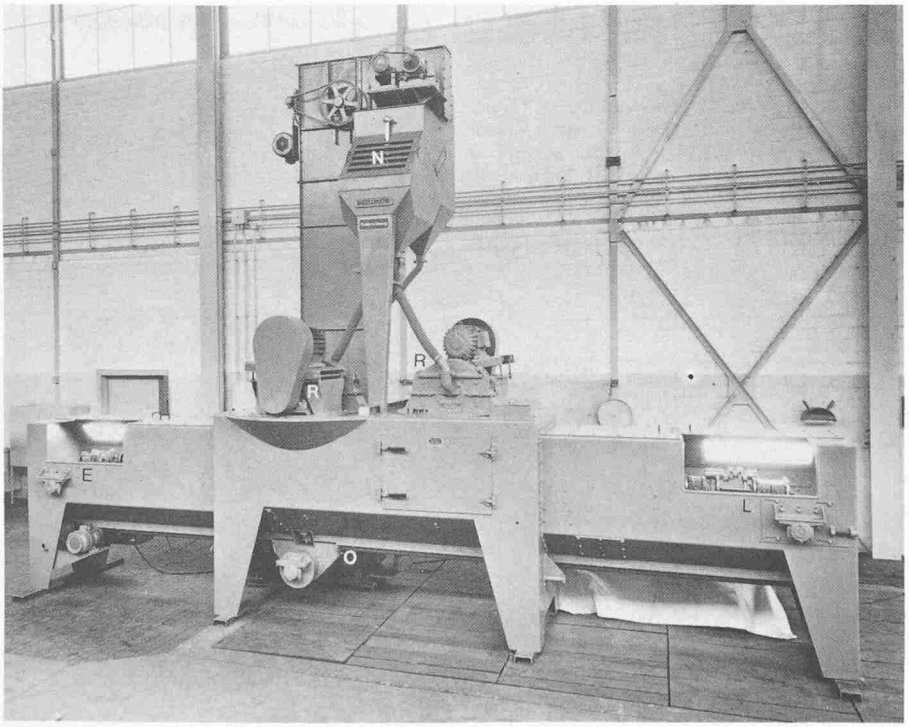

Bild 18A. Mit zwei Schleuderrädern von je 25 bis 30 PS ausgerüstete, nach dem Durchlaufprinzip arbeitende Maschine für das Peenen von Stirnrädern. Zahnradgetriebewellen mit Durchschleusung der Werkstücke gemäss Schema Bild 18A.
R: Schleuderradeinheiten auf dem Dach der Maschine aufgebaut und so angeordnet, dass die Schleuderstrahlen gegeneinander konvergieren. L: Beladestation. E: Entlade-Ende der Maschine. N: Hochleistungs-Kaskadenabscheider. O: Strahlmittel-Rücktransport-Einrichtung zum Becherwerksfuss bestehend aus Materialsammeltrichter, Längs- und Querförderschnecken.
Photo: Graber und Wening AG., Neftenbach

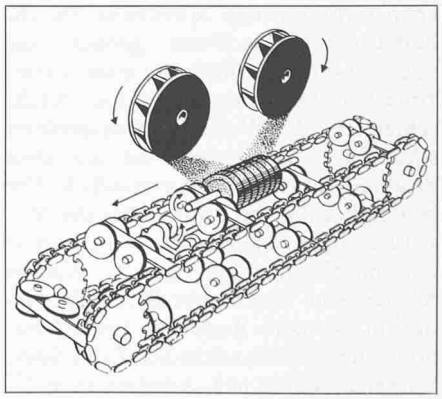

Bild 18B.: Durchlaufmaschine für das Peenen von Getriebewellen, Stirnrädern usw. Schema der Transporteinrichtung für die Durchschleusung der Werkstücke mit seitwärts ausserhalb der Strahlzone angeordneten, durch Traversen miteinander verbundenen Transportketten

und werden deshalb von den in der Längsrichtung strahlenden Schleuderstrahlen der Räder nicht bestrichen. Der Verschleiss wird so auf ein Minimum reduziert. Auf den Aufnahmevorrichtungen für die Werkstücke liegt eine gerade vor dem Eintritt in den Strahlraum stehende Zahnradvorgelegewelle. Im Inneren der Maschine (in Bild 19 somit nicht sichtbar) befinden sich zwei von aussen angetriebene, parallel zur Längsachse angeordnete Gummiwalzen, die über die im Bild 19 gut sichtbaren Zwischenscheiben auf den Traversen, den Werkstücken beim Durchlauf durch die Strahlzone eine Drehbewegung um die Längsachse übertragen. Die vom Peeningverfahren verlangte gleichmässige Beaufschlagung sämtlicher Zähne ist hier einwandfrei erfüllt. Da Maschinen dieser Bauart mit zwei Schleuderrädern bestückt werden, steht eine entsprechend grosse Strahlleistung zur Verfügung, die sich bei entsprechend grosser Produktion gut ausnützen lässt. Für die Bedienung ist normalerweise je ein Mann am Belade- und am Entladeende notwendig (ausgenommen bei automatischen Be- und Entladevorrichtungen).

Es werden jedoch auch nach dem gleichen Grundprinzip arbeitende Durchlauf-Peening-Maschinen gebaut, die aber mit einem vollständig anders konzipierten Mechanismus für die Durchschleusung der Werkstücke ausgerüstet sind. Ihre Arbeitsweise ist aus dem Strahlschema Bild 20 A ersichtlich. Die beiden parallel zur Längsachse der Maschine angeordneten, mit einer dicken Gummischicht überzogenen Walzen reichen vom Beginn der Beschickungsstation bis zum Ende der Entladestation. Die zu behandelnden Zahnräder, Vorgelegewellen usw. können nicht direkt auf die Gummiwalzen aufgelegt werden, sondern müssen in an beiden Enden mit Scheiben versehenen Hilfseinrichtungen eingespannt werden (Bilder 20 B und 20 C). In den dicken Gummibelag einer der beiden Walzen ist wie aus Bild 20 C hervorgeht, auf fast der ganzen Walzenlänge ein trapezförmiges Schraubengewinde ausgespart, in das die Scheiben der Einspannvorrichtungen eingreifen. Die Drehbewegung der Gummiwalzen überträgt sich somit auf die Hilfseinrichtungen und damit auch auf die Zahnräder. Durch das Schraubengewinde auf der Leitwalze erhalten die Werkstücke aber gleichzeitig auch eine Translationsbewegung in der Längsrichtung der Maschine und werden mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit von der Belade- zur Entladestation geführt.

Jedes der beiden beschriebenen Transportsysteme hat seine Vor- und Nachteile. Bei der Lösung gemäss Bild 20 A bildet selbstverständlich das Einspannen der Werkstücke in spezielle Hilfseinrichtungen einen zusätzlichen Kostenfaktor, der auch den Gestehungspreis der Peening-Behandlung beeinflusst. Dies fällt um so mehr ins Gewicht, als die Montage in die Einspannvorrichtungen, und der folgende Ausbau der Werkstücke von Hand vorgenommen werden müssen. Allerdings können in manchen Fällen die Einspannvorrichtungen einheitlich ausgeführt werden, wodurch die Verwendung automatischer Be- und Entladeaggregate wesentlich erleichtert wird.

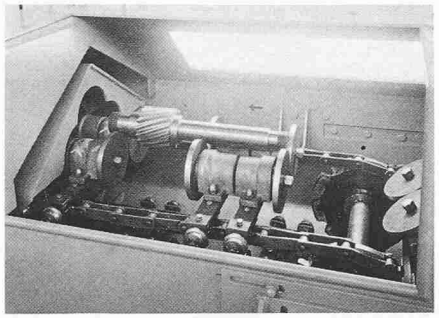

Bild 19. Blick in die Beladestation einer Durchlaufmaschine für das Peenen von Getriebewellen, Stirnrädern usw. mit Transportsystem für die Werkstücke gemäss Schema Bild 18A. Unmittelbar vor dem Eintritt in Strahlraum (links im Bild) ist eine auf den Drehvorrichtungen der Traversen liegende Getriebewelle zu sehen Photo: Graber und Wening AG., Neftenbach

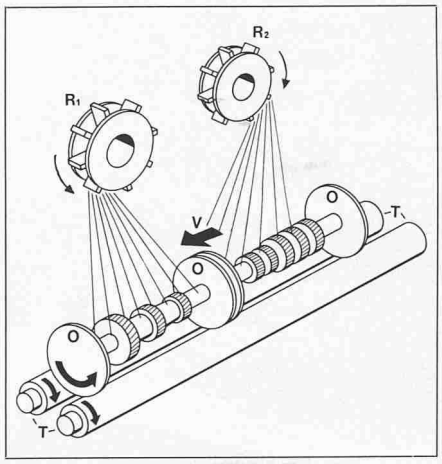

Bild 20A: Durchlaufmaschine für das Peenen von Getriebewellen und ähnlichen Teilen. Schema der Arbeitsweise unter Verwendung von Einspann-Vorrichtungen für die Durchschleusung der Werkstücke durch die Anlage.
R_1, R_2: Schleuderräder auf dem Dach der Maschine aufgebaut, so dass die Schleuderstrahlen gegeneinander konvergieren. T: in der Längsrichtung der Maschine angeordnetes, mit einer dicken Gummischicht überzogenes Walzenpaar für den Transport der Einspannvorrichtungen vom Beginn der Beladestation bis zum Ende der Entladestation. O: Mitnehmerscheiben der Einspannvorrichtungen für die Werkstücke. V: Richtung der durch ein in einer der Tragwalzenausgesparrtes Schraubengewinde an die Einspannvorrichtungen übertragene Vorschubbewegung (siehe auch Bild 20B und 20C).

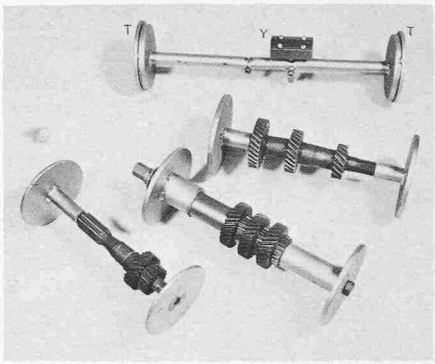

Bild 20B. Einspannvorrichtungen für die Durchschleusung von Stirnrädern, Vorgelegewellen und ähnlichen Teilen durch mit Längswalzen ausgerüstete Durchlaufmaschinen gemäss Arbeitsprinzip Bild 20A. In diesen Maschinen wird auch eine ähnliche Hilfsvorrichtung für den Durchlauf eines Almen-Test-Einspannblocks samt Prüfplättchen zwecks Messung der Strahlintensität benötigt. Eine solche ist im Bild als Position T – T zu oberst zu sehen, wobei der Aufspannblock für das Almen-Testprüfpättchen mit Y gekennzeichnet ist.
Photo: Graber und Wening AG, Neftenbach

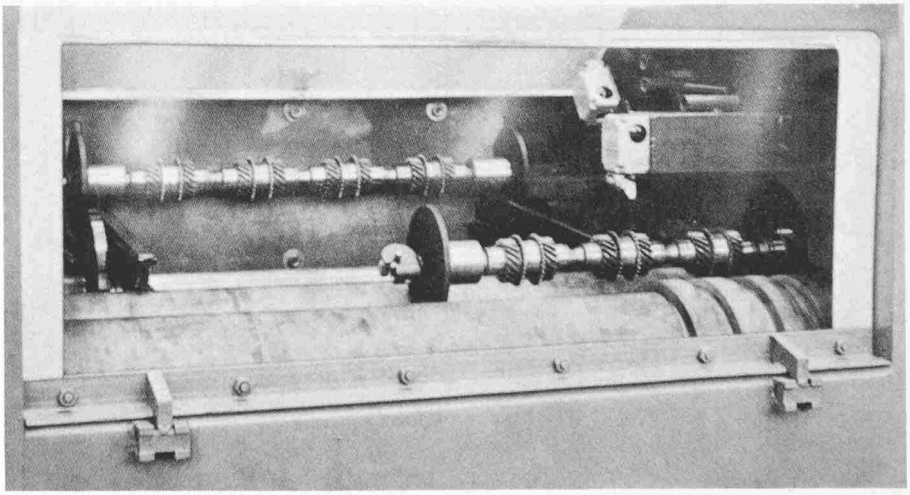

Bild 20C. Blick in die offene Beladestation einer mit zwei Schleuderrädern bestückten Durchlauf-Peeningmaschine und Durchschleusung der Werkstücke gemäss Arbeitsschema Bild 20A. Die beiden mit einer dicken Gummischicht überzogenen Tragwalzen sind gut zu sehen, wobei die vordere, der Beschickungsöffnung nähere als Leitwalze dient. Das hierzu dienende, in den dicken Gummi ausgesparrte, trapezförmige Schraubengewinde beginnt unmittelbar vor dem Strahlraum der Maschine und vermittelt den Einspannvorrichtungen neben der Drehbewegung um die Längsachse auch den Durchschub durch die Maschine.
Photo: Wheelabrator-Berger GmbH + Co., D-Bergisch-Gladbach

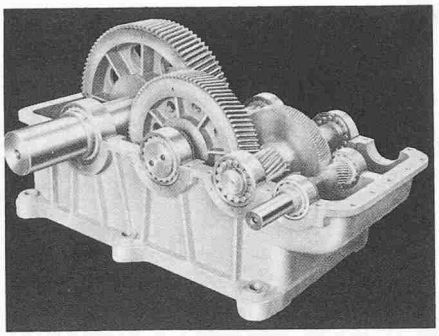

Bild 21. Kissling-Stirnrad-Untersetzungsgetriebe. Blick bei abgenommenem Gehäusedeckel auf die drei Stirnradpaare, ausgelegt für eine Untersetzung von 1460 auf 4 UpM. Fussabmessungen 1700×820 mm. Höhe inkl. Gehäusedeckel 1165 mm. Gewicht 2700 kg.
Photo: L. Kissling & Co., Zürich

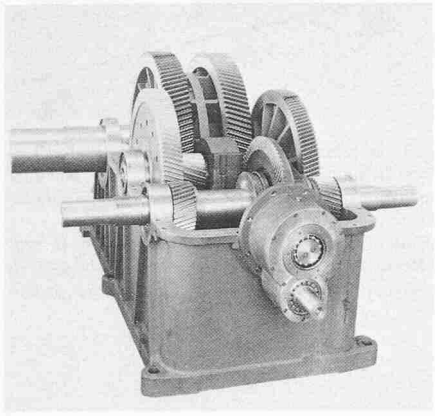

Bild 22 Getriebe für Luftseilbahn ausgelegt für eine Leistung von 1100 kW bei einer Übersetzung im Hauptantrieb von 1400 auf 64 UpM in zwei Stirnradstufen mit gehärteter und geschliffener Pfeilverzahnung. Im Getriebe ist überdies auch ein mittels eines Kegelradsatzes nach Bedarf ein- bzw. abschaltbarer Notantrieb mit einer Übersetzung von 1600 auf 12,8 UpM. eingebaut.
Photo: L. Kissling & Co., Zürich

Zahnräder für Getriebe mittlerer Grösse

Die bisher besprochenen Anlagen dienen der Behandlung von Getriebeteilen aus der Automobilindustrie und verwandter Arbeitsgebiete. Es handelt sich um Werkstücke, die in grossen Serien anfallen. Andere Verhältnisse liegen beim Peenen von Zahnrädern für Getriebe mittlerer Grösse vor, was am besten durch die nachfolgenden Beispiele beleuchtet werden kann. Spricht man im Zusammenhang mit dem Peenen von Zahnrädern von Getrieben mittlerer Grösse, versteht man darunter vor allem die Abmessungen und nicht etwa die zu übertragende Leistung.

Bild 21 zeigt als erstes Beispiel eine Getriebebauart, die vielfach Verwendung für Pendelseilbahnen, Hubwerke, Förderanlagen, Mischwerke und ähnliche Zwecke verwendet wird. Das Reduktionsverhältnis beträgt 1460 zu 4 Das Gewicht einschliesslich des abgenommenen Deckels beträgt etwa 2700 kg. Das Gehäuse enthält drei Stirnräderpaare mit Schrägverzahnung; sein Fuss misst 1700×820 mm; die Gesamthöhe beträgt 1165 mm.

Bild 22 zeigt bei abgenommenem Dekkel das Innere eines für den Antrieb einer Luftseilbahn gebauten Getriebes, das für eine Leistung von 1100 kW ausgelegt worden ist und neben dem Hauptantrieb auch noch einen Notantrieb enthält, der mittels eines Kegelradsatzes nach Bedarf zu- bzw. abgeschaltet werden kann. Die Übersetzung im Hauptantrieb beträgt 1400 zu 64 während der Notantrieb eine solche von 1600 zu 12,8 aufweist. Ausserdem ist zu beachten, dass beide Stirnradstufen mit einer gepfeilten Verzahnung in gehärteter und geschliffener Ausführung ausgelegt worden sind.

Beim dritten Beispiel handelt es sich um ein Maag-Getriebe, das für den Antrieb eines Warmwalzwerkes bestimmt war, das an die holländischen Stahlwerke Hoogovens in Ijmuiden geliefert worden ist. Bild 23 A zeigt zunächst zwei für dieses Getriebe bestimmte Stirnzahnräder mit einsatzgehärteter und geschliffener Schrägverzahnung. Die Zahnbreite beträgt 600 mm. Die übrigen Daten sind der Bildlegende zu entnehmen. Bild 23 B vermittelt ein Detail der Verzahnung eines zum gleichen Getriebe gehörenden Zahnritzels mit einer Zahnbreite von 800 mm. Auch hier wurde die Verzahnung einsatzgehärtet und geschliffen. Die Aufnahme veranschaulicht die Sorgfalt, die auf die Formgebung der Zähne und vor allem auf den Zahngrund verwendet worden ist. Die technischen Daten des Zahnritzels sind der Bildlegende zu entnehmen. Bild 23 C zeigt sodann das Schleifen der Verzahnung eines Stirnrades auf einer Maag-Zahnradschleifmaschine Type HSS-460 S. Die Festigkeit des Zahnkranzmaterials betrug beim nach Ijmuiden gelieferten Getriebe 120 bis 130 kg/mm².

Die Firma Maag-Zahnräder AG Zürich wendet in ihrem Hochleistungsgetriebebau im allgemeinen das Shot-peening-Verfahren nicht an. Im Gegensatz zu dieser Praxis wurden an sämtlichen Zahnrädern und Ritzeln des von Maag für den Antrieb des Warmwalzwerkes Hoogovens in Ijmuiden gelieferten Getriebes sowohl der ausgerundete (Protuberanz) Zahngrund als auch die Übergänge vom Zahngrund zum Zahnfuss nach dem Shot-peening-Verfahren behandelt. Die mit Almen-Test-Plättchen Type A_2 gemessene Strahlintensität betrug für sämtliche Zahnräder und Ritzel einheitlich 11,0 Mikroinch, was einem Wert von etwa 0,28 mm A_2 entspricht. Nach dem Peenen wurden die Zahnflanken sämtlicher Zahnräder und Ritzel noch auf Maag-Zahnradschleifmaschinen geschliffen. Bemerkenswert die hier angewandte Strahlintensität, die wesentlich niedriger ist, als aufgrund

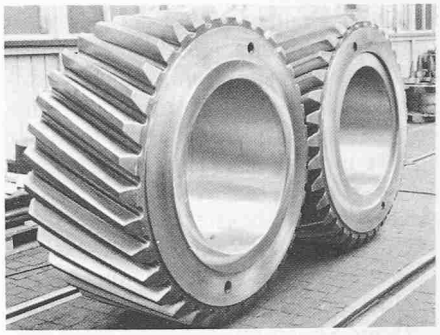

Bild 23A. Zwei Stirnzahnräder mit einsatzgehärteter und geschliffener Schrägverzahnung und 600 mm Zahnbreite bestimmt für ein Maag-Getriebe für den Antrieb eines Warmwalzwerkes für die Stahlwerke Hoogovens. Zähnezahl (z): 35; Modul (m): 34; Zahnbreite (b): 600 mm und Zahnschräge β = 23°20', Festigkeit des Zahnkranzmaterials 120–130 kg/mm², Strahlintensität beim Peenen gemessen nach Almen-Test A_2 = 11,0 Mikroinches = 0,28 mm
Photo: Maag-Zahnräder AG., Zürich

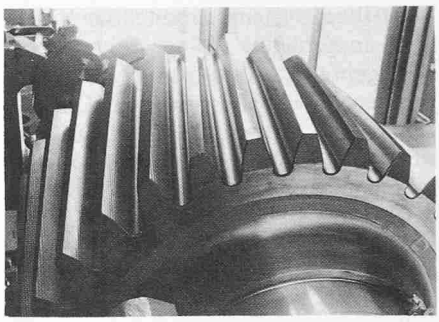

Bild 23B Detail der Verzahnung eines Zahnritzels mit einer Zahnbreite von 800 mm und mit einsatzgehärteter und geschliffener Verzahnung bestimmt für ein Maag-Getriebe zum Antrieb eines Warmwalzwerkes für die Stahlwerke Hoogovens. Man beachte die im Bild gut sichtbare sorgfältige Ausrundung (Protuberanz) des Zahngrundes. Zähnezahl (z): 31, Modul (m): 35, Zahnbreite (b): 800 mm und Zahnschräge = 10°30', Festigkeit des Zahnkranzmaterials 120–130 kg/mm², Strahlintensität beim Shotpeenen, gemessen nach Almen-Test A_2 = 11,0 Mikroinches = 0,28 mm.
Photo: Maag-Zahnräder AG., Zürich

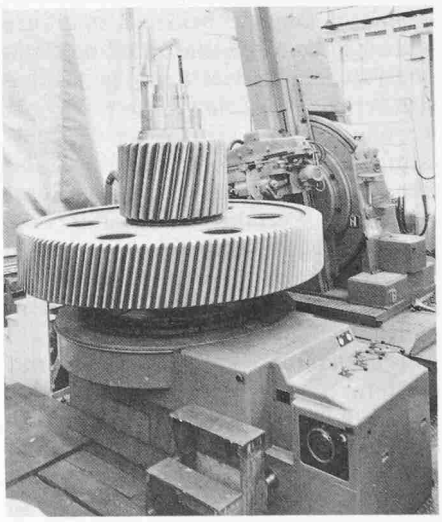

Bild 23C. Schleifen der Verzahnung eines für ein Maag-Getriebe zum Antrieb eines Warmwalzwerkes bestimmten Zahnrades auf einer Maag-Zahnradschleifmaschine Type HSS-460 S. Zähnezahl (z): 132, Modul (m): 23,6, Zahnbreite (b): 560 mm. Festigkeit des Zahnkranzmaterials 120–130 kg/mm²; Strahlintensität beim Peenen gemessen nach Almen-Test A_2 = 11,0 Mikroinches = 0,28 mm.
Photo: Maag-Zahnräder AG., Zürich

von Bild 7 entsprechend der Materialstärke und somit gemäss der Zahnfussdicke im allgemeinen empfohlen wird.

Beim Bau von Maschinen zum Peenen von Zahnrädern für Getriebe mittlerer Grösse muss der Konstrukteur auf folgende, für den Betrieb wichtige Faktoren besonders Rücksicht nehmen:

- Die benötigten Zahnräder und Ritzel werden zumeist einzeln angefertigt. Nur verhältnismässig selten können kleine Serien mit geringen Stückzahlen aufgelegt werden.
- Es handelt sich um Werkstücke mit einem beachtlichen Gewicht, die verhältnismässig unhandlich sind. Die Maschinen müssen deshalb so ausgelegt werden, dass das Beladen und Entladen mit Hilfe eines Krans oder eines Hebezuges bequem durchgeführt werden kann.

Bild 24 zeigt eine mit einem nach dem Vacu-Blast-System arbeitenden Blaskopf ausgerüstete Anlage zum Peenen von gepfeilten und somit schrägverzahnten, hochbeanspruchten Doppelzahnrädern mittlerer Grösse. Auffällig ist die Anlehnung an den Werkzeugmaschinenbau, die durch die Verwendung des Vacu-Blast-Systems ermöglicht wird. Es arbeitet mit Druckluft, wobei das Gehäuse des Blaskopfes (Position S in Bild 24) die eigentliche Arbeitsstelle vollständig von der Umgebung abschliesst. Das Absaugen und Rückführen des Strahlmittels geschieht durch Unterdruck von einer in einem Hilfsaggregat eingebauten Vakuumpumpe aus über eine flexible Saugleitung. Die Arbeitsweise des Blaskopfs und des ganzen Vacu-Blast-Systems ist früher an dieser Stelle beschrieben worden.[11].

Die in Bild 24 gezeigte Maschine ist für das Peenen von Rädern bis zu 800 mm Durchmesser ausgelegt. Um die hier erforderliche vollständig gleichmässige Beaufschlagung der beiden Zahnkränze und eine überall gleiche Strahlintensität und Flächenüberdeckung zu gewährleisten, erhält das Zahnrad eine Drehbewegung während gleichzeitig der Blaskopf eine hin- und hergehende Translationsbewegung parallel zur Rotationsachse des Werkstückes ausführt. Alle diese Bewegungsabläufe werden nach entsprechender Vorwahl automatisch gesteuert und überwacht. Die Wellenenden der Räder liegen nicht direkt auf den Rollenböcken der Maschine auf, sondern sind durch aufgesteckte Schutzabdeckungen vor Beschädigungen geschützt. Die Verwendung eines Vacu-Blast-Blaskopfes ermöglicht eine offene Bauart der ganzen Anlage, so dass die zu behandelnden Werkstücke direkt mit Hebezeug oder Kran eingebracht und nach Abschluss der Peeningbehandlung in gleicher Weise auch wieder weggenommen werden können.

Andere Verhältnisse ergeben sich bei mit einem Schleuderrad ausgerüsteten Maschinen. Hier ist eine offene Bauart

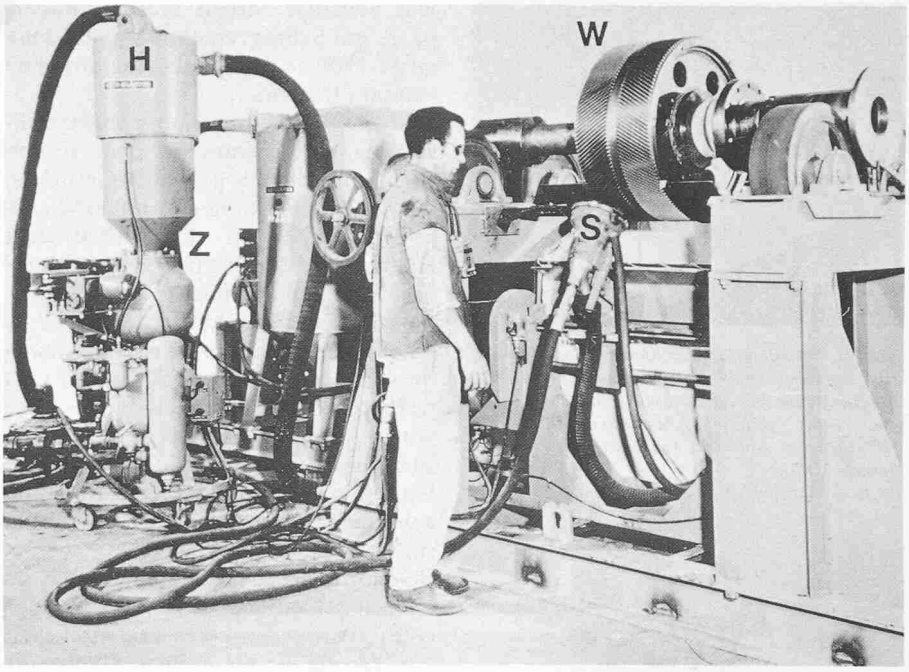

Bild 24. Nach dem Vacu-Blast-System arbeitende Anlage zum Shot-peenen von gepfeilten Helikoid-Doppel-Zahnrädern bis 800 mm Durchmesser für Dampfturbinen-Reduktionsgetriebe grosser Leistung. Die ganze Zahnbreite wird automatisch mehrfach bestrichen, da sich das Zahnrad dreht, während der Blaskopf eine hin- und hergehende Bewegung parallel zur Rotationsachse ausführt.
Z: Zwei-Kammer-Druckgebläse mit automatischer Umschaltung für kontinuierlichen Strahlbetrieb. H: aufgebauter Kaskadenabscheider für die Aufbereitung und Reinigung des Stahlschrots. W: Helikoid-Doppel-Zahnrad. S: Blaskopf nach dem System Vacu-Blast arbeitend mit Absaugung und Rückführung des Strahlmittels (Stahlschrot) durch Vakuum.
Photo: Vacu-Blast Corporation; Belmont, Calif. USA

wegen der grossen Ausdehnung des sich ausfächernden Schleuderstrahls unmöglich. Man verwendet deshalb einen mit Tragwalzen ausgerüsteten Werkstückwagen, der zum Be- bzw. Entladen mittels Hebezug oder Krananlage nach Bedarf aus der Strahlmaschine herausgefahren werden kann. Das hier beim Peenen zur Anwendung gelangende Arbeitsprinzip geht aus Bild 25 hervor. Auch bei dieser Lösung müssen die Wellenenden der Räder durch Aufstekken geeigneter Schutzabdeckungen gegen Beschädigungen durch den Schleuderstrahl abgeschirmt werden. Dies geschieht noch bevor der Werkstückwagen mit dem zu behandelnden Zahnrad in den Strahlraum eingefahren wird. Die beiden auf diesem Wagen fest montierten Tragwalzen sind auf ihrer ganzen Länge mit einer verhältnismässig dicken Gummischicht in verschleiss- und abriebfester, mittelharter Qualität überzogen. Das zu behandelnde Zahnrad liegt mit dem Zahnkranz direkt auf dem Gummibelag des Walzenpaares auf und erhält, wie in Bild 25 durch Pfeile angedeutet, auf diese Weise während der Strahlbehandlung eine Rotationsbewegung um seine Längsachse. Die Drehzahl der Tragwalzen muss in weiten Grenzen verstellt werden können. Nicht nur die vom Fabrikationsprogramm her bedingten Grössenunterschiede der Zahnräder müsen berücksichtigt werden, sondern auch der Raddurchmesser, der manchmal ein Mehrfaches des zugehörenden Ritzels betragen kann. Bild 26 zeigt den Antriebsmechanismus der beiden Tragwalzen, der im Innern eines stirnseitig an den Werkstückwagen angebauten

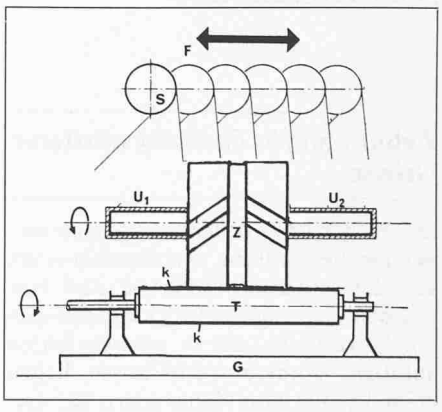

Bild 25. Schematische Darstellung der Arbeitsweise einer mit einer hin- und herfahrenden Schleuderradeinheit ausgerüsteten Maschine zum Peenen von Getriebezahnrädern mittlerer Grösse.
S: Schleuderradeinheit. F: hin- und hergehende Fahrbewegung der Schleuderradeinheit (Bild 27). In der Darstellung ist angedeutet, dass in den beidseitigen Endstellungen der Schleuderstrahl jeweilen den Rand des zu peenenden Zahnkranzes vollständig verlassen haben muss, bevor die Fahrrichtung gewechselt werden darf. Z: Zahnrad mit gepfeilter Verzahnung. U_1 und U_2: Schutzabdeckungen für die Wellenenden des zu peenenden Zahnrades. G: Werkstückwagen für die zu peenenden Zahnräder, wird zum Beladen und Entladen aus der Anlage nach vorn ausgefahren. T: Tragwalzenpaar auf dem Werkstückwagen aufgebaut und durch Elektromotor über Reduziergetriebe und Drehzahlregulierung angetrieben (siehe Bild 26). k: Gummiüberzug der Tragwalzen

Vorbaus untergebracht ist. Die Drehzahlverstellung erfolgt mittels des vorn sichtbaren Variators. Die Drehbewegung des Zahnrades genügt jedoch nicht, um die vollständig gleichmässige Beaufschlagung beider Zahnkränze sicherzustellen. Um die verlangte, überall gleiche Strahlintensität und Flächenüberdeckung zu erhalten, muss der Schleuderstrahl eine hin- und hergehende Translationsbewegung entlang der Rotationsachse des Werkstückes ausführen. Wie aus Bild 27 ersichtlich, ist zu diesem Zwecke die Schleuderradeinheit samt Antriebsmotor auf einem auf dem Dach des Maschinengehäuses hin- und herfahrenden Schleuderradwagen aufgebaut. Die Strahlmittelzufuhr zum Schleuderrad erfolgt mit Hilfe eines Teleskoprohres. Für den Durchtritt des Schleuderstrahls ist im Dach ein Längsschlitz ausgespart, der durch vorn und hinten an das Schleuderradgehäuse anschliessende und sich selbsttätig aufrollende Gummibänder abgeschlossen wird. Es muss aber auch beachtet werden, dass das langgestreckte Strahlbild eines Schleuderrades auf seiner ganzen Länge zwischen Kopf und Schwanz grosse Intensitätsunterschiede aufweist. Wie in Bild 24 schematisch angedeutet, ist es deshalb unbedingt erforderlich, dass der ausgefächerte, in der Längsachse der Maschine liegende Schleuderstrahl bei jeder Hin- und Herfahrt unbedingt den äusseren Rand des Zahnkranzes bereits vollständig verlassen haben muss, bevor die Umkehrbewegung eingeleitet werden darf.

Die Lösung des Problems mit Hilfe eines hin- und herfahrenden Schleuderrades gemäss dem in Bild 25 dargestellten Arbeitsprinzip bietet den grossen Vorteil, sämtliche Einstellungen auf einfache Weise genau und zuverlässig jederzeit reproduzieren zu können. Wird überdies noch die Strahlmittelkörnung einwandfrei unter Kontrolle gehalten, so ist die sichere und einfache Reproduzierbarkeit von Strahlintensität und Überdeckungsgrad garantiert. Diese Vorteile kommen besonders dort zum Tragen, wo es sich darum handelt, bei vorgeschriebenen Unterhaltsarbeiten in regelmässigen Zeitabständen Peening-Arbeiten gemäss Pflichtenheft an Getriebezahnrädern auszuführen, wie dies beispielsweise an Schiffsantrieben von Zerstörern, Torpedobooten und ähnlichen Kriegsschifftypen der Fall ist, die beim Fahren mit Höchstgeschwindigkeit stark überlastet werden. Diese Unterhaltsarbeiten müssen überdies vielfach in ausgesprochenen Reparaturwerften auf auswärtigen Basen durchgeführt werden. Wesentliche Vorteile bietet eine solche einfache und sichere Reproduzierbarkeit aller Einstellungen auch in der eigentlichen Fabrikation, denn Getriebe mittlerer Grösse werden zumeist nur einzeln oder in ganz kleinen Serien hergestellt.

Das Peenen grosser Zahnräder

Zahnräder und Antriebszahnkränze mit grossem Durchmesser werden in spezialisierten Werken hergestellt und vor allem für den Antrieb von Zementmühlen, von Walzwerken verschiedener Art, aber auch von Erdbewegungsmaschinen sowie von Erzmühlen usw. benötigt. Es sei in diesem Zusammenhang auch erwähnt, dass in einer russischen Ingenieurzeitschrift eine ausführliche Arbeit über das Peenen von Zahnrädern mit grossem Modul und somit auch mit grossem Durchmesser erschienen ist. Solod und Mitarbeiter haben dort [14] auch eine Lebenserwartungscharakteristik über diesen Sonderfall veröffentlicht. Es geht daraus hervor, dass durch Peenen auch in diesem Fall eine wesentliche Verbesserung der Standzeit erreicht werden kann.

Bild 28 A zeigt das Innere des Strahlraumes einer mit einem Schleuderrad ausgerüsteten Maschinenanlage, die für das Peenen von grossen Zahnrädern mit Durchmessern bis zu 5 Meter ausgelegt ist, während aus Bild 28 B die gegenseitige Lage von Zahnkranz und dem sich in vertikaler Richtung hin- und herbewegenden Schleuderrad hervorgeht. Die Maschine amerikanischer Bauart steht in den Werken einer im Bau von Ausrüstungen für den Schiffbau spezialisierten Firma, zu deren Fabrikationsprogramm auch die für den Antrieb der Schiffsschrauben benötigten grossen Getriebe gehören. Sowohl zum Be- als auch für das Entladen muss der schwere und mit Schleissschutzplatten verkleidete Werkstückwagen aus der Anlage herausgefahren werden, denn in Anbetracht der Abmessungen und des Gewichts der zu peenenden Räder ist hierfür eine entsprechende Krananlage notwendig. Wie aus den Bildern hervorgeht, werden die Zahnräder in horizontaler Lage und somit mit senkrecht stehender Welle der Peening-Behandlung unterzogen. Der Werkstückwagen wird dabei auf die in den Boden des Strahlraumes eingelassene und von unten her angetriebene Drehplattform geschoben bis die Achse des Zahnrades mit dem Drehzentrum der Plattform übereinstimmt. Beim Peenen dreht sich somit das Rad um seine Achse, während gleichzeitg das Schleuderrad eine vertikale Hin- und Herbewegung ausführt, woraus sich eine gleichmässige Beaufschlagung des Zahnkranzes über die ganze Breite ergibt. Hierzu wird im allgemeinen das Einlaufstück des Schleuderrades so eingestellt, dass der Schleuderstrahl in horizontaler Lage aus dem Schleuderrad austritt und auch der Zahngrund die erforderliche gleichmässige Flächenüberdeckung erhält. Über die mit dieser Anlage erreichten Ergebnisse wird folgendes berichtet:

Bei den grossen, für Schiffsantriebe bestimmten Zahnrädern stellte die Herstellerfirma (General Electric Co. USA) fest, dass ohne Shot-peening-Behandlung und unter Normalbelastung Zahnbrüche bereits bei 900000 Lastwechseln auftraten. Nach Shot-peening-Behandlung hingegen und bei 60% Überlast kamen auch nach einer Million Lastwechsel noch keine Zahnbrüche vor.

In der Anlage gemäss Bild 28 A werden jedoch nicht nur Räder mit Stirnverzahnungen behandelt, sondern oft auch solche mit Schräg-, Pfeil- und Helikoid-Verzahnungen. In vielen solchen Fällen und vor allem dort, wo es darum geht, durch Peenen dem Auftreten des Pittingeffektes vorzubeugen, ist es erforderlich, auch die Zahnflanken mitzubehandeln. Dazu wird das Rad so auf

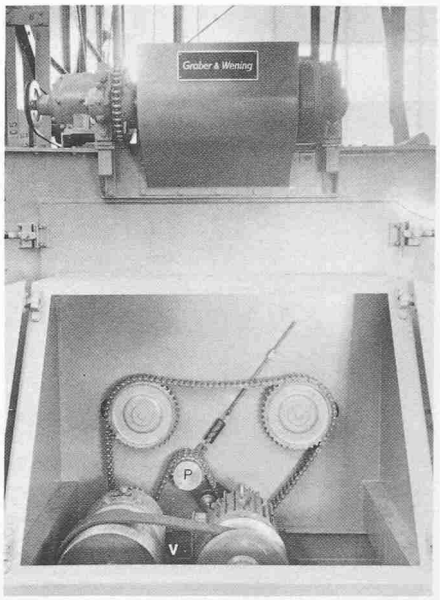

Bild 26. Mit einer auf dem Dach der Maschine aufgebauten, hin- und herfahrenden Schleuderradeinheit ausgerüstete Anlage zum Peenen von Getriebezahnrädern mittlerer Grösse. Blick in die an der Stirnseite des Werkstückwagens angebaute Antriebsstation für die Drehbewegung der beiden mit einer dicken Gummischicht überzogenen Tragwalzen und des auf ihnen ruhenden zu peenenden Zahnrades. Im Vordergrund der Variator V für die Drehzahlregulierung. Darüber ist der auf dem Maschinendach aufgebauten Antrieb für die Fahrbewegung der Schleuderrad-Einheit zu sehen. P: Spannvorrichtung für Kettenantrieb der Drehwalzen
Photo: Graber und Wening AG., Neftenbach

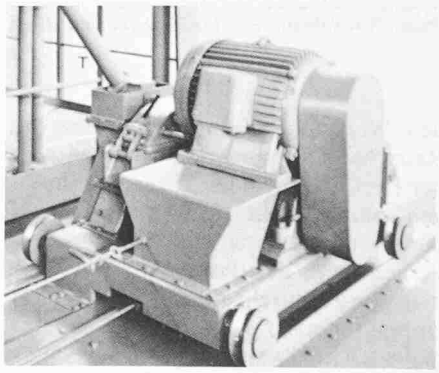

Bild 27. Auf dem Dach des Maschinengehäuses der Anlage zum Peenen von Zahnrädern mittlerer Grösse hin- und herfahrende Schleuderrad-Einheit: Strahlmittel-Zuführung mittels Teleskoprohr T
Photo: Graber und Wenig AG., Neftenbach

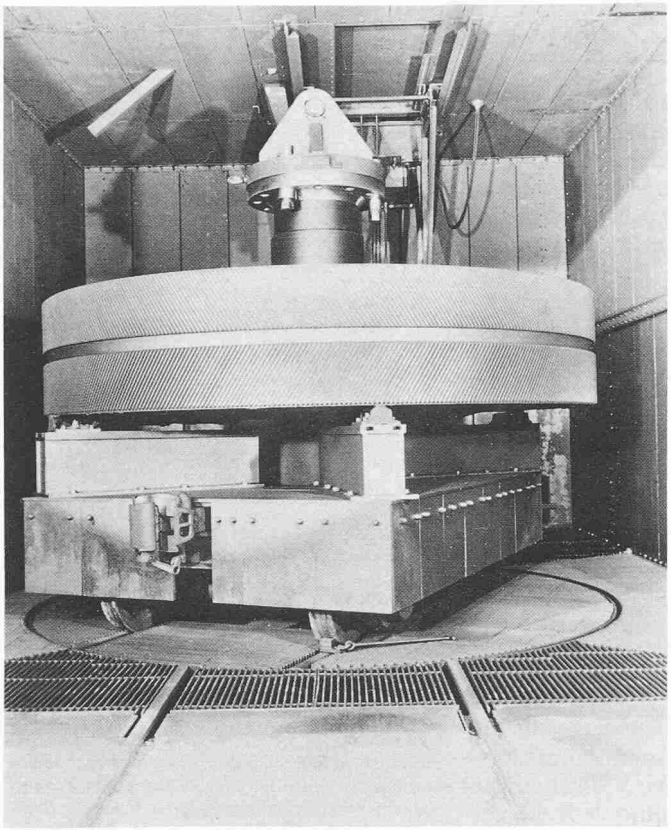

Bild 28A. Blick in das Innere einer mit Schleuderrad ausgerüsteten Strahlanlage zum Peenen von grossen Zahnrädern mit bis zu 5 Meter Durchmesser. Zum Be- und Entladen wird der Werkstückwagen aus der Anlage herausgefahren, da hierfür ein Kran benötigt wird. Wie im Bild ersichtlich, steht der Werkstückwagen auf einer im Boden eingelassenen Drehplattform, die von unten über einen Elektromotor und Reduziergetriebe mechanisch angetrieben wird.
Photo: Wheelabrator-Frye Ine. Mishawaka, Indiana, USA

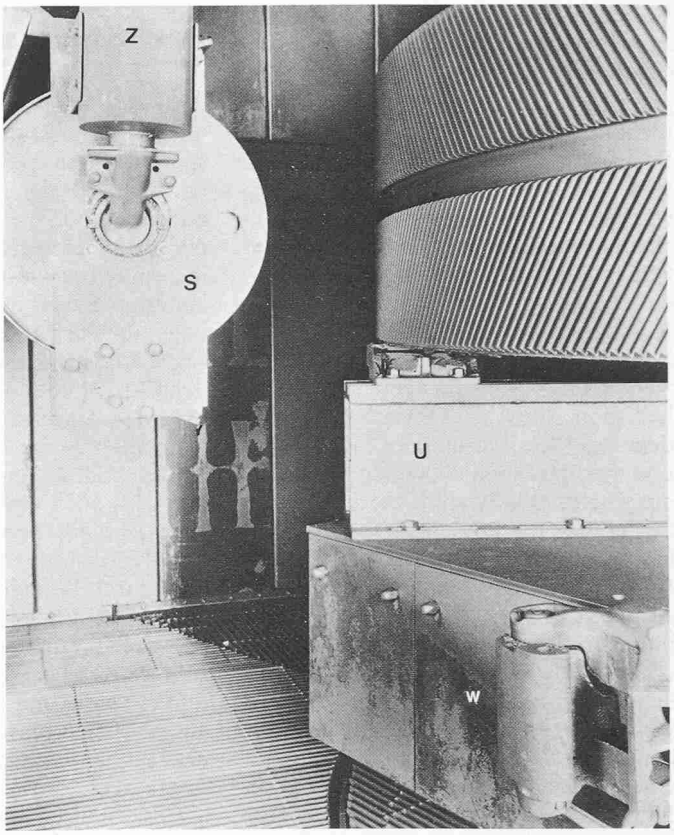

Bild 28B. Mit Schleuderrad ausgerüstete, amerikanische Anlage zum Peenen grosser Zahnräder mit bis zu 5 Meter Durchmesser. Detail der Anlage Bild 28A. Das im Hintergrund zu sehende Schleuderrad führt während der Peening-Behandlung eine vertikale hin- und hergehende Bewegung aus.
S: Schleuderrad. Z: Strahlmittelzuführung. W: Werkstückwagen. U: radial angeordnete, spezielle Abstützvorrichtungen, auf denen das Zahnrad aufliegt.
Photo: Wheelabrator-Frye Ine Mishawaka, Indiana USA.

dem Werkstückwagen gelagert, dass die Radachse gegenüber dem Drehzentrum der Drehplattform leicht versetzt zu liegen kommt. Je nach der Art der Verzahnung wird es unter Umständen erforderlich sein, das Peenen in zwei Arbeitsphasen durchzuführen und zwar je einmal mit nach rechts und sodann einmal nach links versetzter Achslage. Was den Arbeitsbereich der Anlage nach Bild 28 A anbelangt, können Zahnräder bis 5 Meter Durchmesser behandelt werden. Der Bereich ist aber auch nach unten begrenzt, denn der Abstand zwischen Zahnkranz und Schleuderrad nimmt mit dem Kleinerwerden des Zahnkranzdurchmessers rasch zu und erreicht bald einen Wert, der nicht mehr überschritten werden darf. In Anbetracht des grossen Investitionsbedarfs für Anlagen dieses Umfangs besteht deshalb vor allem in Europa der Wunsch nach einem möglichst breiten Verwendungsbereich.

Bild 29 zeigt schematisch den Aufbau einer nach dem gleichen Arbeitsprinzip aufgebauten Anlage, die jedoch einem grösseren Verwendungsbereich Rechnung trägt. Die Maschine kann je nach der zu bewältigenden Produktion mit nur einem oder aber mit zwei Schleuderrädern ausgerüstet werden. Bei der letzten Ausführung sind diese so angeordnet, dass die Schleuderstrahlen gegeneinander konvergieren. Dies bietet vor allem beim Peenen von ausgesprochenen Schräg- und Pfeilverzahnungen den wichtigen Vorteil einer gleichmässigen Beaufschlagung und Flächenüberdeckung sowohl des Zahngrundes als auch der beiden Zahnflanken. Wie aus Bild 29 hervorgeht, bilden die beiden Schleuderräder samt der zugehörenden Strahlmittelzufuhr eine an einem auf dem Dach der Maschine verschiebbar angeordneten Wagen aufgehängte Einheit, die je nach dem Durchmesser des zu behandelnden Zahnrades näher oder weiter weg zum Drehzentrum verschoben werden kann. Dies ergibt einen entsprechend grösseren Arbeitsbereich.

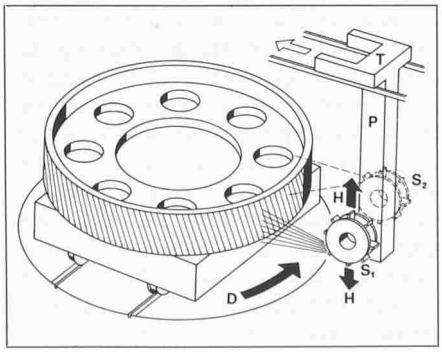

Bild 29. Schema einer Anlage zum Peenen von grossen Zahnrädern gemäss Arbeitsprinzip von Georg Fischer AG mit vergrössertem Einstellbereich durch Aufhängen der beiden Schleuderradeinheiten an einem auf dem Dach des Maschinengehäuses verschiebbar angeordneten Wagen.
S_1, S_2: Schleuderradeinheiten. H: vertikale Hin- und Her-Bewegung der Schleuderradeinheiten. P: Strahlmittelzuführung zu den Schleuderrädern und als Tragkonstruktion ausgebildete Verschalung. T: verschiebbarer Tragwagen in auf dem Maschinendach verlegtem Geleise laufend. D: Drehrichtung der bodeneben im Maschinengehäuse eingebauten Drehplattform

Abschliessend wird in Bild 30 noch eine vollständig anders geartete Lösung gezeigt, die überdies auch das Peenen noch wesentlich grösserer Zahnräder gestattet. Diese als «semi-portable» bezeichnete Ausrüstung ist für die Durchführung solcher Peening-Arbeiten auswärts beim Kunden bestimmt, kann aber selbstverständlich auch dort im eigenen Betrieb verwendet werden, wo nur geringe Stückzahlen zu behandeln sind, welche die Installation einer stationären aufwendigen Anlage nicht rechtfertigen würden. Herstellerin ist die Firma Metal Improvement Comp. in Hackensack N.J., die zur Gruppe der Curtiss Wright Corp. gehört und sich in neun über das ganze Gebiet der USA verteilten Betrieben mit der Durchführung von Peening-Arbeiten in Lohn befasst. Die benötigten Maschinen und Ausrüstungen werden in einer betriebseigenen Konstruktionswerkstätte gebaut, die auch die im Bild 29 gezeigte Ausrüstung hergestellt hat.

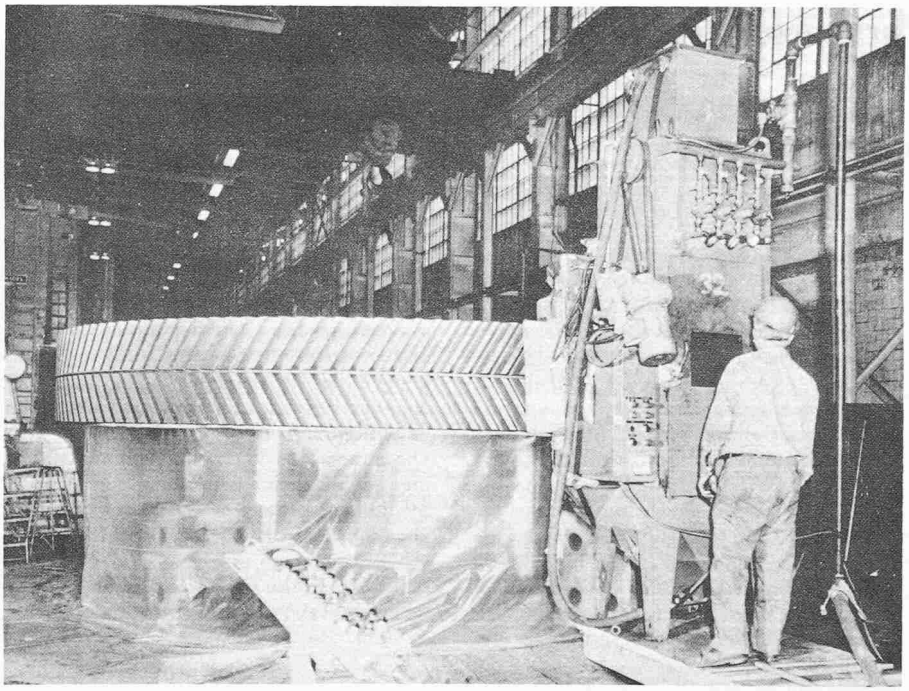

Bild 30. Shot-peenen eines grossen Zahnrades von 7100 mm Durchmesser. Auswärtsarbeit. Nach dem Druckluftsystem arbeitende, als semi-portable bezeichnete Spezialausrüstung. Sie ist mit vier in der Strahlkabine eingebauten, eine vertikale Hin- und Herbewegung ausführenden Injektor-Strahlpistolen ausgerüstet, währenddem die Strahlmittelzufuhr mittels Becherwerk nach dem Gravitationssystem erfolgt. Zusätzliche Abdichtungen: Platiktücher.
Photo: Metal Improvement Company Hackensack N. J.-USA

Auch in Europa bestehen zwei Zweigbetriebe, die Peening-Aufträge in Lohn durchführen. Das Bild zeigt das Peenen eines Zahnrades von 280 Zoll = 7,1 m Durchmesser als Auswärtsarbeit in der Werkstatt eines Kunden. Die rechts im Bild sichtbare Apparatur arbeitet nach dem Druckluftsystem und ist mit vier Injektorstrahlpistolen ausgerüstet, denen das Strahlmittel nach dem Gravitationssystem mit Hilfe eines Becherwerks zugeführt wird. Der Vorbau der Strahlkabine ist vorn offen und schliesst sich unmittelbar an den Zahnkranz des Rades an, um gleichzeitig als Auffangvorrichtung für das herabfallende Strahlmittel zu dienen und dieses sodann dem Becherwerkfuss und damit wieder in den Strahlmittelkreislauf zurückzuführen. Die vier Injektor-Strahlpistolen führen eine von einem Hilfsmotor aus mechanisch angetriebene, vertikale Hin- und Herbewegung quer zur Breite des zu peenenden Zahnkranzes aus. Wie aus der Abbildung ersichtlich, liegt das Zahnrad auf einer durch einen eingebauten Elektromotor mit angebautem Reduktionsgetriebe betätigten Drehvorrichtung. Bei der gewählten Ausführung lassen sich das Austreten von Ricochet und von gelegentlichen Strahlmittelspritzern zwischen dem Vorbau der Strahlkabine und dem Rand des Zahnrades nicht vermeiden. Aus diesem Grunde wird noch zusätzlich an Ort und Stelle durch das Aufhängen von Plastikfolien unter dem Zahnrad und auch über dem Oberteil des Kabinenvorbaus zusätzlich abgedichtet, wie dies übrigens gut auf dem Bild zu sehen ist.

Literaturhinweise

[1] *Horowitz, I.:* «Das Shot-peening-Verfahren». Schweiz. Bauzeitung, Heft 19, 1977
[2] *Straub, J. C.:* «Shot Peening in Gear Design». Vortrag, gehalten an der Tagung der American Gear Manufacturers Association in Hot Springs (Virginia) - A.G.M.A. 109. 13 June 1964
[3] *Horowitz, I.:* «Oberflächenbehandlung mittels Strahlmitteln» Vol. I. Forster-Verlag AG, Zürich 1976, S. 184/5
[4] *Straub, J. C.:* cit. loc.[2]
[5] *Winter, H.:* «Tragfähigkeitssteigerung durch Kugelstrahlen, insbesondere bei Zahnrädern». Werkstattechnik und Maschinenbau, Heft 7, 1956
[6] *Simon, L.E.:* «Improvement of Parts on Motive Power». A.S.M. Symposium on Shot Peening, October 1944
[7] *Broderick Ronald, F.:* «Protective Shot Peening of Propellers». Part I - «Residual Peening Stresses». WADC Technical Report 55-56. ASTIA Document Service Center, Knott Building, Dayton 2, Ohio, USA. Siehe auch *J. C. Straub* in cit. loc.[2]
[8] *Horowitz, I.:* in cit. loc.[1]
[9] *Niemann, G.*, und *Rettig, H.:* «Tragfähigkeitssteigerungen bei gehärteten und ungehärteten Zahnrädern». VDI-Berichte No. 105, 1967
[10] *Straub, J. C.:* in cit. loc. [2]
[11] *Horowitz, I.:* «Das Shot-peening-Verfahren und die Anforderungen an die Anlagetechnik». Schweiz. Bauzeitung, Heft 51/52, 1978, S. 1005, Bild 10
[12] SAE-Spezifikation über die Körnungen P-7 bis P-93. Siehe auch Tabelle XXVII auf Seite 145 in *J. Horowitz, I.*, cit. loc. [3]
[13] *Horowitz, I.:* cit. loc. [11]. Siehe insbesondere Bilder 15 und 17 A
[14] *Solod* und Mitarbeiter: «Improving bending fatigue of large modul gear teeth». Russian engineering journal, vol. 14 No. 1/1972 [18]

Adresse des Verfassers: *J. Horowitz*, dipl. Ing. ETH, Winterthurerstr. 537, 8051 Zürich