

BAM-BERICHT Nr. 38

DER BUNDESANSTALT FÜR
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4

von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

19 Seiten mit 17 Abbildungen und 5 Tabellen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1
Telex 01-83 261 bamb d

Inhalt	Seite
1. Einleitung	1
2. Aus der Literatur bekannt gewordene Ergebnisse von Verschleißuntersuchungen	1
3. In der BAM durchgeführte Untersuchungen	1
3.1 Werkstoff und Proben	1
3.2 Nitrierbehandlungen und Eigenschaften der nitrierten Proben	2
3.3 Durchführung der Verschleißprüfungen	2
3.3.1 Vorbemerkung	2
3.3.2 Experimentelles Vorgehen	2
3.4 Ergebnisse	2
3.4.1 Verschleißprüfungen ohne Schmierung	2
3.4.2 Verschleißprüfungen mit Schmierung	3
3.5 Diskussion der Ergebnisse	4
4. Zusammenfassung	4
5. Literaturverzeichnis	4
6. Diskussionsbemerkungen	5
7. Tabellen	9
8. Bilder	11
9. Anhang	19

Dank

Die hier wiedergegebenen Untersuchungen erfolgten in enger Zusammenarbeit mit der Industrie. So wurden die Nitrierbehandlungen von verschiedenen Firmen übernommen.

Die Verschleißprüfungen führten im Laboratorium für Tribometrie und Tribophysik der Bundesanstalt für Materialprüfung Herr Ing. W. Evers und Herr Ing. grad. W. Schrag durch. Herr Evers war außerdem an der Auswertung und der Diskussion der Ergebnisse beteiligt. Die metallographischen Arbeiten verrichtete Frau B. Manske. Für die Rauheitsmessungen war Herr Ing. grad. J. Schwenzien verantwortlich.

Allen Herstellern und Mitarbeitern sei herzlich gedankt.

1. Einleitung

Das Nitrieren wird seit langem zur Erhöhung des Verschleißwiderstandes und der Dauerschwingfestigkeit von Eisenwerkstoffen eingesetzt. Beim Nitrieren entsteht bekanntlich eine äußere Verbindungsschicht aus kubisch-flächenzentriertem γ' -Fe₄N oder hexagonalem ϵ -Fe_xN oder aus beiden Phasen. An die maximal 20 μ m dicke Verbindungsschicht schließt sich zum Grundwerkstoff hin eine gewöhnlich einige 100 μ m tiefe Ausscheidungszone an.

Zur Zeit sind ca. 15 Nitrierverfahren bekannt, die sich hauptsächlich durch den Aggregatzustand und die chemische Zusammensetzung des Mediums unterscheiden, das Stickstoff und teilweise auch Kohlenstoff, Sauerstoff oder Schwefel abgibt (1). Neuere Entwicklungen konzentrieren sich auf die Erzeugung von homogenen, einphasigen Verbindungsschichten, auf die Verkürzung der Nitrierzeiten und auf die Anwendung von umweltfreundlichen, sicherheitstechnisch risikoarmen Verfahren.

So lassen sich beim Gasnitrieren heute einphasige Verbindungsschichten mit relativ kurzen Nitrierzeiten von 1 bis 3 h erzeugen (2), während früher Nitrierzeiten von 10 bis 100 h üblich waren, die zudem noch zu zweiphasigen, spröden Verbindungsschichten führten. Diese Schichten mußten in der Regel abgeschliffen werden, so daß nur die Eigenschaften der Ausscheidungszone ausgenutzt werden konnten.

Beim Badnitrieren, das in Zyanid-Zyanat-Salzschnmelzen durchgeführt wird, wurde ein umweltfreundliches Verfahren entwickelt, welches die Entfernung von giftigem Altsalz weitgehend überflüssig macht (3).

Das Ionitrieren, das im Plasma einer Glimmentladung stattfindet, gestattet die Erzeugung von porenfreien Verbindungsschichten. Es kann bei niedrigeren Temperaturen als die anderen Verfahren erfolgen.

Über vergleichende Verschleißuntersuchungen an unterschiedlich nitrierten Stählen wurde bisher nur wenig berichtet (4 . . . 7). Da in diesen Veröffentlichungen höchstens die neueren Entwicklungen des Ionitrierens, nicht aber die des Gas- und Badnitrierens berücksichtigt sind, wurde die Bundesanstalt für Materialprüfung von verschiedenen Seiten gebeten, vergleichende Verschleißuntersuchungen an bad-, gas- und ionitriertem Stahl durchzuführen. Nach einer Übersicht über die bisher bekannt gewordenen Arbeiten sollen die Ergebnisse solcher Untersuchungen vorgestellt werden.

2. Aus der Literatur bekannt gewordene Ergebnisse von Verschleißuntersuchungen

Tauscher und Stecher (4) berichten über Verschleißprüfungen nach dem Siebel-Kehl-Prinzip an gehärteten, badnitrierten und (langzeit-)gasnitrierten Proben aus den Stählen C 10, 16 MnCr 5, 20 MoCr 5 und C 45. Die badnitrierten Proben hatten das beste Verschleißverhalten. Außerdem zeigte sich ein ausgeprägter Einfluß des verwendeten Stahles. So hatte nitrierter 20 MoCr 5 ein günstigeres Verschleißverhalten als nitrierter 16 MnCr 5, gleichgültig, ob gas- oder badnitriert wurde.

Nach Untersuchungen von Eysell (5) ist bei gasnitriertem

C 45 der Verschleißbetrag bei alleiniger Anwesenheit von γ' -Fe₄N in der Verbindungsschicht größer als bei zusätzlicher Anwesenheit von ϵ -Fe_xN. Badnitrierte Proben, bei denen die neben Stickstoff auch Kohlenstoff enthaltende Verbindungsschicht nur aus der ϵ -Phase besteht, hatten einen noch niedrigeren Verschleißbetrag.

Umfangreiche Untersuchungen an (langzeit-)gasnitrierten, badnitrierten und ionitrierten Gußeisensorten mit Kugelgraphit und an Nitrierstahl 31 CrMoV 9 wurden von Keller (6) durchgeführt. Die mit einem Zwei-Scheiben-Prüfstand, Bauart Amsler, durchgeführten Verschleißuntersuchungen ergaben vor allem bei Gußeisen Vorteile für das Ionitrieren, während bei dem Nitrierstahl die Vorteile weniger deutlich waren.

Über ähnliche Untersuchungen berichtet auch Edenhofer (7). Hier dienten GGG 60, 42 CrMo 4, 31 CrMoV 9 und X 40 Cr 13 als Grundwerkstoffe. Die (langzeit-)gasnitrierten Proben wiesen den höchsten Verschleißbetrag auf, wofür die Mehrphasigkeit der Verbindungsschicht und die Bildung von Korngrenzennitriden in der Ausscheidungszone verantwortlich gemacht wurden. Die badnitrierten Proben zeigten ein besseres Verschleißverhalten. Weitaus am besten schnitten die ionitrierten Proben ab, was auf die Vermeidung der Bildung von Korngrenzennitriden beim Nitrieren beruhen soll. Auch bei diesen Untersuchungen machte sich der Grundwerkstoff bemerkbar. So führten beim Stahl X 40 Cr 13 alle Nitrierbehandlungen zu einem niedrigeren Verschleiß als bei den anderen Werkstoffen.

3. In der BAM durchgeführte Untersuchungen

3.1 Werkstoff und Proben

Für die Untersuchungen wurde der Stahl 42 CrMo 4 ausgewählt. Eine spektralanalytische Analyse von vier Proben dieses Stahles ergab die folgenden Konzentrationen der Begleitelemente in Gewichtsprozenten.

C	0,39 . . . 0,43	Cr	0,93 . . . 1,19
Si	0,29 . . . 0,34	Ni	0,091 . . . 0,176
Mn	0,61 . . . 0,72	Mo	0,191 . . . 0,252
P	0,012 . . . 0,029	Al	0,014 . . . 0,037
S	0,010 . . . 0,028	Co	0,021 . . . 0,023
Cu	0,127 . . . 0,133		

Aus diesem Werkstoff wurden für die Verschleißprüfungen Proben in Form von Stiften und Scheiben nach *Bild 1* des Anhangs gefertigt. Vor dem Nitrieren erfuhren sämtliche Proben die folgende Vergütungsbehandlung:

Härten: 850°C → Öl 65°C
Anlassen: 1 h bei 600°C → H₂O

Dadurch ergab sich das in *Bild 1 a* wiedergegebene Vergütungsgefüge mit den in *Bild 1 b* aufgeführten Härtewerten von 299 bis 343 HV 10. Nach dem Vergüten wurden die halbkugelförmigen Reibflächen der Stifte einige Sekunden mit Schleifpapier der Körnung 400 vorsichtig auf einer Drehbank abgezogen, während die Scheiben auf einem Lapmaster mit Pulver der Körnung 1900 geläpft wurden. Dadurch erhielten die Proben die in *Bild 1 c* zusammengestellten Rauheitswerte. In diesem Zustand wurden die Proben zur Durchführung unterschiedlicher Nitrierbehandlungen an verschiedene Hersteller geschickt.

3.2 Nitrierbehandlungen und Eigenschaften der nitrierten Proben

Die wichtigsten Daten der Proben sind in *Tabelle 1* zusammengestellt:

- a) die Nitrierbehandlungen
- b) die Bezeichnung der Nitridphase in der Verbindungsschicht
- c) die Dicke der Verbindungsschicht d_v
- d) die Oberflächenhärte HV 0,05

Es wurden je zwei Probenserien gasnitriert (G 1, G 2), badnitriert (B 1, B 2) und ionitriert (I 1, I 2). Etwas aus dem Rahmen fallen die mit I 1 bezeichneten ionitrierten Proben, welche sich durch die lange Nitrierdauer von 36 h, die Bildung der γ' -Phase und die relativ dünne Verbindungsschicht von den anderen Proben unterscheiden.

Das Gefüge von nitrierten Stiftproben ist in *Bild 2* wiedergegeben. Die Verbindungsschicht ist deutlich über der Ausscheidungszone zu erkennen. Sie erscheint bei den mit G 1 bezeichneten gasnitrierten und mit I 1 bezeichneten Proben sehr homogen, bei den mit B 1 und I 2 bezeichneten Proben dagegen etwas inhomogener; bei der mit I 2 bezeichneten Probe besteht sie offensichtlich aus zwei Phasen. Innerhalb der Ausscheidungszone sehen die Gefüge aller Proben ähnlich aus.

In der Ausscheidungszone wurden Kleinlast-Härtemessungen durchgeführt, um den Härteverlauf zu bestimmen (*Bild 3*). Bei den ionitrierten Proben I 1 fällt die Härte langsamer als bei den anderen Proben zum Kern hin ab, was durch die größere Anreicherung mit Stickstoff infolge der langen Nitrierdauer bedingt sein dürfte.

Durch das Nitrieren nahm die Rauhtiefe der Proben maximal um einen Faktor von ca. 2 zu (*Tabelle 2 a*). Da der Verschleiß auch von der Rauhtiefe abhängt, wurde versucht, alle Proben auf annähernd gleiche Rauhtiefe zu bringen. Dazu wurden die Stifte vorsichtig mit Papier der Körnung 600 abgezogen und die Scheiben geläpft. Es mußten unterschiedlich lange Läppzeiten gewählt werden, um eine einigermaßen einheitliche Rauhtiefe zu erreichen (*Tabelle 2 b*). Durch das Läppen wurden im wesentlichen nur die Rauheitsspitzen abgetragen, ohne daß die Verbindungsschicht viel an Dicke verlor, wie aus parallel zum Läppen durchgeführten Messungen der Dickenabnahme ermittelt wurde.

Für die Verschleißprüfungen wurden die Proben mit den in *Tabelle 2 c* zusammengestellten Rauhtiefen ausgewählt. Bei den Verschleißprüfungen ohne Schmierung lagen die gasnitrierten Proben G 2 etwas oberhalb und die ionitrierten Scheiben I 2 etwas unterhalb der mittleren Rauhtiefen.

3.3 Durchführung der Verschleißprüfungen

3.3.1 Vorbemerkung

Für die Verschleißprüfungen werden Modell-Verschleißprüfgeräte eingesetzt, mit denen im wesentlichen vier Aufgabenbereiche bearbeitet werden können (8):

- I. Aufklärung von Reibungs- und Verschleißmechanismen

- II. Überwachung der Produktion von tribotechnischen Werkstoffen und Schmierstoffen
- III. Entwicklung von tribotechnischen Werkstoffen und Schmierstoffen
- IV. Simulation von tribologischen Vorgängen in Maschinen.

Die hier durchgeführten Untersuchungen gehören dem II. Aufgabenbereich an, in dem geprüft wird, ob tribotechnische Werkstoffe, die aus verschiedenen Chargen stammen oder für die abgeänderte oder neue Produktionsverfahren entwickelt wurden, die gleichen tribologischen Eigenschaften besitzen.

3.3.2 Experimentelles Vorgehen

Für die Verschleißprüfungen wurden zwei Stift-Scheibe-Tribometer verwendet, bei denen ein Stift mit der Normalkraft F_N gegen eine rotierende Scheibe gedrückt wird (*Bild 4*). Die Stifte besaßen eine halbkugelförmige Reibfläche mit einem Radius von 32 ± 2 mm, so daß zu Beginn der Verschleißbeanspruchung ein punktförmiger Kontakt herrschte, der sich mit beginnendem Verschleiß zu einer Fläche ausweitete.

Die Verschleißprüfungen wurden ohne und mit Schmierung durchgeführt. Ohne Schmierung fanden die Prüfungen in einer abgeschlossenen Versuchskammer statt, in die synthetische Luft mit 20 % Sauerstoff und 80 % Stickstoff bei einer relativen Feuchte von 50 % eingelassen wurde. Die Raumtemperatur wurde mit einem Temperier-Aggregat auf $T = 23 \pm 0,5^\circ\text{C}$ gehalten. Die Prüfungen mit Schmierung erfolgten mit einem anderen Tribometer unter Tauchschmierung in einem ebenfalls auf 23°C temperierten Ölbad (Volumen 40 ml). Als Schmierstoff diente ein Öl der Klasse SAE 10. Vor dem Einbau in die Tribometer wurden die Proben in einem Freon-Ultraschallbad gereinigt.

Die gemessenen Verschleißgrößen sind in *Bild 5* schematisch dargestellt. Bei den Stiften dient das abgeriebene Volumen V_{St} als Verschleißmeßgröße; es läßt sich aus dem leicht meßbaren Durchmesser der Verschleißkalotte 2 a ermitteln. Zusätzlich ist die Stiftlängenabnahme h_{St} angegeben. Der Scheibenverschleiß wird durch den planimetrischen Scheibenverschleißbetrag W_{Sch} ausgedrückt, der sich durch Ausplanimetrieren der Profildiagramme der Verschleißspuren gewinnen läßt.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Verschleißprüfungen ohne Schmierung

Die Ergebnisse der Verschleißprüfungen ohne Schmierung sind für die unterschiedlich nitrierten Stiftproben in Abhängigkeit vom Gleitweg in *Bild 6* dargestellt. Man erkennt, daß alle Proben nach einer mehr oder weniger ausgedehnten Periode eines erhöhten Einlaufverschleißes einem konstanten Verschleißanstieg zustreben. Unter der hier wirkenden Normalkraft von 3,2 N wird im Zentrum der Reibfläche die Verbindungsschicht voll abgetragen, so daß auch die Ausscheidungszone beansprucht wird. Aussagen über die Rangfolge des Verschleißverhaltens lassen sich *Bild 7* entnehmen, in dem der Stiftverschleißbetrag über der Belastung aufgetragen ist. Bei kleinen Normalkräften, bei denen hauptsächlich die Verbindungsschicht beansprucht wird, läßt sich kein systematischer Unterschied zwischen den unterschiedlich nitrierten Proben feststellen. Bei höheren Belastungen,

bei denen auch die Ausscheidungszone zum Tragen kommt, schneiden dagegen die ionitrierten und die mit G 1 bezeichneten gasnitrierten Proben besser ab als die anderen. – Bei den Scheiben war unter den gegebenen Bedingungen in keinem Fall Verschleiß meßbar.

Um die Auswirkungen der tribologischen Beanspruchung in der Verbindungsschicht und in der Ausscheidungszone voneinander zu trennen, wurden unter anderen Bedingungen an den Scheiben weitere Verschleißprüfungen durchgeführt. Dazu wurde die Gleitgeschwindigkeit von 0,1 auf 0,5 m/s und der Gleitweg von 1 auf 2,5 km erhöht. Als Gegenkörper dienten boriierte Stifte mit einem Reibflächenradius von 3,5 mm und einer Rauhtiefe R_z von $(1,09 \pm 0,37) \mu\text{m}$. Es wurden boriierte Stifte gewählt, weil sie einen hohen Verschleißwiderstand besitzen und wegen des intermetallischen Charakters der äußeren Boridschicht kaum zur Adhäsion mit nitrierten Werkstoffen neigen dürften.

Unter den nun vorliegenden Bedingungen entstanden auf der Scheibe in der Verbindungsschicht Verschleißspuren, deren Profildiagramme in *Bild 8* wiedergegeben sind. Die Tiefe der Verschleißspuren ist bei allen Proben annähernd gleich. Nur bei den ionitrierten Scheiben wurde die Verbindungsschicht, deren Dicke zwischen 4 und 6 μm lag, teilweise durchbrochen.

Weiterhin wurde durch Lappen von den Scheiben eine Schicht von 30 μm abgetragen und damit die gesamte Verbindungsschicht entfernt, so daß jetzt nur die Ausscheidungszone auf ihr Verschleißverhalten geprüft werden konnte. Die Rauhtiefe R_z dieser Proben betrug $(1,09 \pm 0,04) \mu\text{m}$. Die Ergebnisse der Verschleißprüfungen an diesen Proben enthält *Bild 9*. Die Tiefe der Verschleißspuren ist bei allen Proben wiederum nahezu gleich. Eine quantitative Vorstellung von der Größe der Verschleißbeträge erhält man durch Ausplanimetrieren der Profildiagramme der Verschleißspuren, deren Ergebnisse in *Bild 10* zusammengestellt sind. Danach hat bei allen Nitrierverfahren die Verbindungsschicht einen höheren Verschleißbetrag als die Ausscheidungszone. Innerhalb der Verbindungsschichten liegen die Verschleißbeträge der unterschiedlich nitrierten Scheiben annähernd auf dem gleichen Niveau. Dabei verhält sich die γ -Phase der ionitrierten Proben (I 1) ebenso gut wie die ϵ -Phase der anderen Proben. In der Ausscheidungszone sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Nitrierverfahren ebenfalls nicht sehr erheblich.

In bezug auf die Reibung zeigten alle Paarungen nahezu den gleichen Verlauf und den gleichen Betrag des Reibungskoeffizienten. Daher sind in *Tabelle 3* nur die Mittelwerte der Reibungskoeffizienten aller Paarungen zusammengestellt, wobei μ_a den Reibungskoeffizienten im Beginn und μ_e den Wert am Ende des Gleitweges angibt. Bei den Paarungen der boriierten Stifte mit den nitrierten Scheiben lagen die Reibungskoeffizienten höher als bei den Paarungen, bei denen Stift und Scheibe nitriert waren. Ob die Verbindungsschicht oder die Ausscheidungszone als Gegenkörper der boriierten Stifte diente, hatte keinen Einfluß auf die Größe des Reibungskoeffizienten.

Die maximalen reibbedingten Temperaturerhöhungen der Stifte, die mit einem Thermoelement 2 mm von der Reibfläche entfernt gemessen wurden, lagen zwischen 4 und 14°C.

Abschließend sei zu den Verschleißprüfungen ohne Schmie-

rung noch bemerkt, daß als Hauptverschleißmechanismen Tribooxidation und Furchung auftraten.

3.4.2 Verschleißprüfungen mit Schmierung

Die Ergebnisse der Verschleißprüfungen mit Schmierung sind in *Bild 11* wiedergegeben. Mit I 2 bezeichnete ionitrierte Proben standen als Stifte nicht zur Verfügung. Man erkennt, daß die Verschleißbeträge der unterschiedlich nitrierten Proben in derselben Größenordnung liegen. Die Verschleißbeträge der ionitrierten Proben I 1 sind nur mit zwei Meßpunkten belegt, die durch die gestrichelte Linie verbunden sind; die anderen Meßpunkte lagen teilweise weit oberhalb des Wertes von 0,10 mm² und konnten daher in das vorliegende Diagramm nicht eingezeichnet werden.

Eine mikroskopische Beobachtung der Stiftreibflächen zeigte, daß die Verbindungsschicht im Zentrum der Stiftreibfläche voll abgetragen wurde, so daß dort auch die Ausscheidungszone tribologisch beansprucht wurde (*Bild 12*). Bei den meisten Proben bildete sich auf der Ausscheidungszone tribochemisch eine dichte Reaktionsschicht. Von den ionitrierten Proben I 1 hatten solche dichten Schichten nur zwei Proben (*Bild 13 a und e*), deren Verschleißbeträge in *Bild 11* eingetragen sind. Bei den anderen ionitrierten Proben, deren Verschleißbeträge extrem hoch lagen, waren die Reaktionsschichten nur unvollkommen ausgebildet (*Bild 13 b, c, d, f*). Offenbar war das Wachstum der Reaktionsschichten auf der Ausscheidungszone bei den niedrigeren Normalkräften von 49 und 123 N mit der Dicke der durch Verschleiß abgetragenen Verbindungsschicht verknüpft. Bei den Proben mit einer dünnen Verbindungsschicht (*Bild 13 b und d*) fehlt die Reaktionsschicht nämlich fast vollständig. – Auf die möglichen Ursachen für diese Erscheinung wird in der Diskussion eingegangen. –

Ähnlich wie bei den Verschleißuntersuchungen ohne Schmierung wurden auch mit Schmierung der Verschleiß der Verbindungsschicht und der Ausscheidungszone getrennt voneinander untersucht, indem boriierte Stifte als Gegenkörper der unterschiedlich nitrierten Scheiben eingesetzt wurden. Der Radius der halbkugelförmigen Stiftreibflächen betrug hier 6,2 mm und die Rauhtiefe $R_z = (0,71 \pm 0,06) \mu\text{m}$.

Innerhalb der Verbindungsschicht der unterschiedlich nitrierten Scheiben ist trotz der hohen Normalkraft von 400 N die Tiefe der Verschleißspuren relativ gering (*Bild 14*). Bei den ionitrierten Scheiben (I 1, I 2) trat außer einer Riefe fast gar kein Verschleiß auf.

Während der tribologischen Beanspruchungen der Ausscheidungszone, die durch Lappen freigelegt wurden und dadurch die Rauhtiefe $R_z = (0,83 \pm 0,10) \mu\text{m}$ erhalten hatten, kam es wiederholt zu Freßerscheinungen, die beim Einsatz von badnitrierten Scheiben so stark waren, daß die Läufe auch bei einer Wiederholung vorzeitig abgebrochen werden mußten. Für die Paarung boriierten Stift/ionitrierte Scheibe I 1 war ebenfalls ein zweiter Lauf notwendig. In allen Fällen waren die Verschleißspuren sehr stark aufgeraut (*Bild 15*). Wertet man die planimetrischen Scheibenverschleißbeträge aus (*Bild 16*), so ergibt sich, daß bei Schmierung die Verbindungsschichten einen um fast zwei Größenordnungen kleineren Verschleißbetrag als die Ausscheidungszone haben. Innerhalb der Verbindungsschicht verhält sich die ionitrierte (I 1) Scheibe mit der γ -Phase am günstigsten. Trotzdem dürfte die Lebensdauer ihrer Verbindungsschicht

wegen ihrer geringen Dicke niedriger als bei den anderen Proben sein.

Bei tribologischer Beanspruchung der Ausscheidungszone schneiden die gasnitrierten (G 1) und die ionitrierten (I 2) Proben am besten ab.

Bezüglich der Reibung ist festzustellen, daß die Anfangsreibungskoeffizienten μ_a der Paarungen, bei denen beide Partner nitriert waren, etwas höher waren als bei Einsatz borierter Stifte gegen nitrierte Scheiben (Tabelle 4). Wurde bei den Scheiben nur die Verbindungsschicht beansprucht, so nahm der Reibungskoeffizient mit zunehmendem Gleitweg ab. Bei Beanspruchung der Ausscheidungszone wurde dagegen eine Vergrößerung der Reibungskoeffizienten und bei den ionitrierten Proben zusätzlich Reibkraftspitzen ($\mu = 0,18$) beobachtet. – Die reibbedingte Temperaturerhöhung der Stifte betrug maximal 13°C . – Als Verschleißmechanismen traten Tribooxidation, Furchung und bei Beanspruchung der Ausscheidungszone auch Adhäsion auf.

3.5 Diskussion der Ergebnisse

Im ungeschmierten Zustand weist unter den gegebenen Bedingungen, bei denen der Adhäsionsmechanismus eine untergeordnete Rolle spielt, die Ausscheidungszone aller Proben einen niedrigeren Verschleißbetrag als die Verbindungsschicht auf (Bild 10). Möglicherweise wirken sich hier die größere Zähigkeit und die Druckeigenspannungen der Ausscheidungszone günstig aus. Die Proben, bei denen erst die Verbindungsschicht und nach deren Verschleiß die Ausscheidungszone beansprucht werden, haben daher dann einen niedrigeren Verschleißbetrag, wenn die Verbindungsschicht dünn ist (Bild 7, Tabelle 1). Darauf beruht das bei höheren Normalkräften günstige Abschneiden der ionitrierten (I 1, I 2) und der gasnitrierten (G 1) Proben.

Bei Schmierung hat dagegen die Ausscheidungszone bei allen Proben einen wesentlich höheren Verschleißbetrag als die Verbindungsschicht (Bild 16). Hierfür ist wahrscheinlich die schlechte Benetzung der chromhaltigen Ausscheidungszone durch den Schmierfilm verantwortlich.

Werden Verbindungsschicht und Ausscheidungszone nacheinander beansprucht, so bilden sich tribochemische Reaktions-Schutzschichten, wenn die verschleißfestere Verbindungsschicht nicht zu dünn ist und somit nicht zu schnell abgetragen wird. Durch die dann infolge der Reibung herrschende örtlich hohe Energiekonzentration dürfte die Reaktionsschichtbildung begünstigt werden. Das relativ schlechte Abschneiden der ionitrierten (I 1) Stift-Proben im geschmierten Zustand ist daher auf die geringe Dicke ihrer Verbindungsschicht zurückzuführen.

4. Zusammenfassung

Die angewendeten tribologischen Beanspruchungen führten zu den folgenden Ergebnissen:

- 1) Die Verschleißbeträge der unterschiedlich nitrierten Proben liegen in derselben Größenordnung.

- 2) Die γ' -Phase der ionitrierten Proben hat keinen niedrigeren, sondern eher einen höheren Verschleißwiderstand als die ϵ -Phase der anderen Proben.

- 3) Wenn die metallische Adhäsion zwischen den Verschleißpartnern schwach ist, bietet im ungeschmierten Zustand eine dünne Verbindungsschicht Vorteile, weil nach deren Verschleiß die Ausscheidungszone einen höheren Verschleißwiderstand als die Verbindungsschicht hat.

- 4) Unter Schmierung hat dagegen die Verbindungsschicht einen höheren Verschleißwiderstand als die Ausscheidungszone. Hier ist eine zu dünne Verbindungsschicht nachteilig, weil nach ihrem Verschleiß in der Ausscheidungszone ein hoher Verschleißbetrag verbunden mit der Gefahr des Fressens auftritt.

5. Literaturverzeichnis

- 1) Liedtke, D.:
Vergleich der verschiedenen Nitrierverfahren und Kriterien für die Auswahl.
Härtereitechn. Mitt. 28 (1973), S. 384 – 393
- 2) Wüning, J.:
Neues Verfahren und Anlagen zum Nitrieren mit E-Verbindungsschicht.
Härtereitechn. Mitt. 29 (1974), S. 42 – 49
- 3) Finnem, B., u. H. Kunst:
Über ein neues, umweltfreundliches Salzbadnitrierverfahren.
Härtereitechn. Mitt. 30 (1975), S. 26 – 33
- 4) Tauscher, H., u. E. Stecher:
Beitrag zum Verschleißverhalten badnitrierter und oberflächengehärteter Stahlteile.
Ifl.-Mitt. 4 (1965), S. 220 – 224
- 5) Eysell, F. W.:
Der Unterschied zwischen Gasnitrieren und Tenifer-Behandlung.
Oesterreichische Ingenieur-Zeitschrift 13 (1970), Heft 5
- 6) Keller, K.:
Vergleichsuntersuchungen an gas-, bad- und ionitrierten Maschinenteilen.
Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2244 (1972)
- 7) Edenhofer, B.:
Vergleich verschiedener Nitrierverfahren unter besonderer Berücksichtigung des Ionitrierens.
Fachberichte für Oberflächentechnik 12 (1974), S. 97 bis 102
- 8) Habig, K.-H.:
Möglichkeiten der Modellverschleißprüfung.
Materialprüfung Heft 10 (1975), im Druck

6. Diskussionsbemerkungen

Kunst 1):

Bekanntlich wurde bisher auf dem Gebiet vergleichender Verschleißuntersuchungen an nach verschiedenen Verfahren nitrierten Proben sehr wenig gearbeitet. Die Bereitschaft des Verfassers, eine Untersuchung über dieses Thema zu beginnen, verdient daher unbedingt Anerkennung. Der Bericht erscheint uns jedoch in einigen Punkten diskussionsbedürftig: In einem solchen Bericht sollte auf die Wiedergabe von Markennamen verzichtet werden. Das ist hier auch weitgehend geschehen, jedoch mit Ausnahme „Ionitrieren“. Hierbei handelt es sich um eine Firmenbezeichnung; statt dessen sollte besser von Glimmnitrieren oder Nitrieren in Glimmentladung gesprochen werden.

Antwort:

Der Begriff „Ionitrieren“ wird auch im Titel des Forschungsberichtes des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2244 „Vergleichsuntersuchungen an gas-, bad- und ionitrierten Maschinenelementen“ verwendet. Es war uns nicht bekannt, daß es sich hierbei um eine Firmenbezeichnung handelt.

Kunst:

Der Ausdruck „Diffusionszone“ für denjenigen Bereich, in dem Stickstoff bei unlegierten Stählen in fester Lösung vorliegt, ist sicher nicht korrekt, da auch die Verbindungsschicht Teil der Diffusionszone ist. Der Ausdruck „Ausscheidungszone“ erscheint jedoch nicht besser, da bei unlegierten Stählen nach Wasserabschreckung keine Ausscheidungen auftreten.

Antwort:

Leider wurde es in DIN 17014 versäumt, einen Begriff für die unter der Verbindungsschicht liegende Zone anzugeben. Da bei Nitrierstählen in dieser Zone Nitride ausgeschieden werden, erscheint der von Keller in dem oben genannten Forschungsbericht verwendete Begriff „Ausscheidungszone“ besser als der Begriff „Diffusionszone“, weil letzterer sich auf den gesamten mit Stickstoff angereicherten Oberflächenbereich bezieht.

Kunst:

In Bild 2 ist bei der nach Verfahren B 2 badnitrierten Probe keinerlei Porenzone zu erkennen. Das legt die Vermutung nahe, daß die metallographischen Untersuchungen in diesem Falle erst nach dem Abziehen mit Schleifpapier vorgenommen wurde. Auffällig ist, daß bei B 2 auch die in Bild 6 eingetragene Schichtdicke deutlich von der aus Bild 2 zu entnehmenden abweicht (in Bild 2 ca. 8 μm , in Bild 6 sind 15 μm eingetragen).

Antwort:

Die in Bild 2 für B 2 wiedergegebene Verbindungsschicht liegt bezüglich ihrer Dicke tatsächlich an der unteren Grenze. In anderen Schliffbildern, die sich für eine photographische Aufnahme nicht so gut eignen, war die Verbindungsschicht dicker und die Porenzone deutlicher zu erkennen. Aus Tabelle 1 kann entnommen werden, daß die aus ca. 20 Proben gemittelte Schichtdicke der mit B 2 bezeichneten Proben ($13,7 \pm 2,0$) μm beträgt. Durch das Abziehen mit Schleifpapier wurde im wesentlichen nur die Rauhtiefe

herabgesetzt (in Bild 6 betrug die Schichtdicke der Probe B übrigens nicht 15, sondern 12 μm).

Kunst:

In dem gesamten Bericht vermißt man eine Abschätzung der Fehler bzw. der Streuungen. Speziell für das Bild 7 wurden Ausschnitte aus dem Bericht kopiert, die Zahlenwerte so genau wie möglich entnommen und nachfolgend zusammengestellt:

Tabelle zu Bild 7

Normalkraft F_N [N]	Stiftlängenabnahme h_{St} [μm]					
	G 1	G 2	B 1	B 2	I 1	I 2
0,50	19	12	9	14	12; 15	17
1,33	13	17	16	19	10	20
2,25	21	18	16	24	12	18
3,20	16	22	22	20	11	20
4,00	20	19; 29	24	26	18	21
5,00	22	26	28	27	19	24

Die Tabelle zeigt, daß sehr große Schwankungen auftreten. Als Beispiel sei hingewiesen auf die Zahlenwerte der Behandlung G 1. Man könnte hiernach den Eindruck gewinnen, daß die Stiftlängenabnahme unabhängig von der Belastung ist. Ähnlich verhält es sich bei J 2. Bei der Behandlung B 2 ist die Stiftlängenabnahme bei der Normalkraft 2,25 N nicht wesentlich geringer als bei 4 oder 5 N. Bei der Behandlung G 2 wurden bei einer Normalkraft von 4 N 19 und 29 μm Stiftlängenabnahme gemessen.

Bei diesen starken Streuungen halten wir es für unzulässig, aus dieser Darstellung den Schluß zu ziehen: „Bei kleinen Normalkräften läßt sich kein systematischer Unterschied zwischen den unterschiedlich nitrierten Proben feststellen, bei höheren Belastungen schneiden dagegen die ionitrierten und die mit G 1 bezeichneten gasnitrierten Proben besser ab als die anderen“.

Antwort:

Die Streuungen der Meßwerte in Bild 7 sind für Verschleißmessungen normal. Es ist durchaus möglich, daß der Verschleißbetrag sich in gewissen Grenzen nur wenig mit der Normalkraft ändert. Dies gilt z. B. dann, wenn mit steigender Normalkraft zunehmend schützende Oxidschichten durch Tribooxidation gebildet werden. Die eingezeichneten Geraden wurden durch Ausgleichsrechnung ermittelt. Bei höheren Normalkräften ist trotz der Streuung der Meßwerte deutlich zu erkennen, daß die mit J 1 bezeichneten Proben einen niedrigeren Verschleißbetrag als z. B. die mit B 1 und B 2 bezeichneten Proben haben.

Kunst:

Vergleicht man die Bilder 6 und 7, so ist offensichtlich, daß die in Bild 6 für 1.000 m Gleitweg eingetragenen Werte identisch sind mit denen von Bild 7 für 3,2 N Normalkraft. Bei der Behandlung B 1 ist in Bild 6 jedoch ein Wert von etwa 19 μm , in Bild 7 von ca. 22 μm eingetragen. Ähnliche Differenzen treten bei G 1 auf. Wahrscheinlich handelt es sich hier um Zeichenfehler, denn es ist wenig wahrscheinlich, daß verschiedene Versuchsergebnisse berücksichtigt wurden mit entsprechender Streuung.

1) Helmut Kunst, Dr.-Ing., Hanau

Antwort:

Die Meßwerte der Bilder 6 und 7 dürfen nur bedingt untereinander verglichen werden, weil sie mit unterschiedlichen Meßmethoden gewonnen wurden. In Bild 6 sind Verschleißkurven wiedergegeben, die während des Verschleißversuchs kontinuierlich mit Hilfe einer kapazitiven Längenmessung ermittelt wurden. Aus der Längenabnahme der Stifte wurde ihr Verschleißvolumen nach der Beziehung

$$V = \frac{\pi}{3} h_{St}^2 (3R - h_{St})$$

abgeschätzt.

In Bild 7 wurde dagegen das Verschleißvolumen aus dem Durchmesser der am Ende der Verschleißprüfung vorliegenden Verschleißkalotte 2 a ermittelt (siehe Bild 5):

$$V = \frac{\pi}{3} (R - \sqrt{R^2 - a^2})^2 (2R - \sqrt{R^2 - a^2})$$

Aus dem so bestimmten Verschleißvolumen wurde dann die zugehörige Stiftlängenabnahme nach der folgenden Beziehung abgeschätzt:

$$h_{St} = \sqrt{\frac{V}{\pi R}}$$

Dabei wurde für den Stiftradius R, der bei den verschiedenen Proben zwischen 30 und 35 mm lag, der Mittelwert aller Stiftradien gewählt. Dagegen wurde in Bild 6 der für die jeweilige Probe ausgemessene Stiftradius eingesetzt.

Bild 6 soll mehr einen qualitativen Eindruck vom Verschleißverlauf vermitteln und zeigen, daß i. allg. nach einer relativ kurzen Periode eines erhöhten Einlaufverschleißes ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Außerdem wird ersichtlich, daß die Verbindungsschicht bei allen Proben im Zentrum der Kontaktfläche voll abgetragen wurde, so daß anschließend die Ausscheidungszone zum Tragen kam.

Für einen quantitativen Vergleich der unterschiedlich nitrierten Proben ist dagegen Bild 7 herauszuziehen, in dem für jedes Nitrierverfahren mindestens sechs Meßwerte eingetragen sind.

Kunst:

Die Feststellung, daß die „Ausscheidungszone“ bessere Verschleißigenschaften als die Verbindungsschicht aufweist, widerspricht allen bisherigen praktischen Erfahrungen. Die Vermutung liegt nahe, daß es sich hier um einen system- bzw. geometriebedingten Effekt handelt. Diese Vermutung wird gestützt durch einen Vergleich der Bilder 7 und 10; während bei Bild 7 nach Durchschleifen der Verbindungsschicht angeblich G 1, J 1 und J 2 am besten abschneiden, ist diese Feststellung bei Bild 10 b (vorherige Entfernung der Verbindungsschicht und borierte Stifte) fast ins Gegenteil verkehrt.

Antwort:

Die Feststellung, daß die Ausscheidungszone bessere Verschleißigenschaften als die Verbindungsschicht hat, wurde in dieser allgemeinen Form vom Verfasser nicht gemacht (siehe 3.5 und Punkt 3 der Zusammenfassung). Natürlich handelt es sich hier wie bei allen Verschleißprozessen um einen systembedingten Effekt. Die Ausscheidungszone hat of-

fenbar dann einen höheren Verschleißwiderstand als die Verbindungsschicht, wenn – und dies muß betont werden – die Adhäsion zwischen den Verschleißpartnern schwach ist. Diese Aussage stützt sich nur auf Bild 10; denn dort hat bei allen Proben, die nach den unterschiedlichen Verfahren nitriert wurden, die Ausscheidungszone einen niedrigeren Verschleißbetrag als die Verbindungsschicht. Diese Beobachtung wird durch eine jüngst erschienene Arbeit von W. D. Mahler: „Modelluntersuchungen zur Verschleißwirkung strömender Schmelzen von glasfaserverstärkten Thermoplasten an Metalloberflächen in Kunststoffverarbeitungsmaschinen. Darmstadt: Dissertation D 17 (1975)“ bestätigt, in der u. a. der Verschleiß von nitrierten Stählen durch strömende glasfaserverstärkte Thermoplastschmelzen untersucht wurde. Auch dort war der Verschleißbetrag der Ausscheidungszone teilweise nur halb so groß wie der der Verbindungsschicht.

Kunst:

Die in Tabelle 3 und 4 niedergelegten Messungen der Reibungskoeffizienten sind überraschend. Es erscheint zweifelhaft, daß der Reibungskoeffizient zwischen einem borierten Stift und einer nitrierten Scheibe auf drei Stellen hinter dem Komma gleich sein soll, wenn die Scheibe eine Verbindungsschicht aufweist oder wenn diese vorher entfernt wurde.

Antwort:

Die in Tabelle 3 und 4 wiedergegebenen Meßwerte des Reibungskoeffizienten μ_a zu Beginn der Verschleißbeanspruchung unterscheiden sich für die verschiedenen Reibpaarungen deshalb nur wenig oder gar nicht, weil alle Proben unabhängig von der chemischen Zusammensetzung ihres Volumens auf der Oberfläche eine vom Umgebungsmedium oder vom Schmierstoff stammende ähnliche Adsorptionsschicht haben; der Reibungskoeffizient ändert sich aber, wenn diese Adsorptionsschicht durch Verschleiß abgetragen wird, wie aus den unterschiedlichen Werten von μ_e , die am Ende der Verschleißversuche gemessen wurden, hervorgeht.

Kunst:

Das vom Verfasser bei Bild 11 gewählte Verfahren, nur zwei Punkte für die Behandlung J 1 einzuzichnen und diese durch eine – wenn auch gestrichelte – Gerade zu verbinden, erscheint uns nicht zulässig. Die im Bericht für den überaus starken Verschleiß der restlichen Proben diskutierte Ursache, nämlich die mangelhafte Ausbildung der Reaktionsschicht, ist doch wohl verfahrensbedingt und nicht auf irgendwelche Nebeneffekte zurückzuführen. Daher geht es nicht an, nur die guten Werte in das Diagramm einzuzichnen und die schlechten wegzulassen.

Antwort:

Das relativ schlechte Abschneiden der ionitrierten Proben im geschmierten Zustand ist deutlich durch Bild 13 belegt und beruht auf dem Ausbleiben einer Reaktionsschichtbildung. Bei zwei Proben bildete sich aber wie bei allen nach den anderen Verfahren nitrierten Proben auch eine Reaktionsschicht, und es zeigte sich, daß der Verschleißbetrag dieser Proben dann in der gleichen Größenordnung wie bei anders nitrierten Proben lag. Nur dies sollte durch die gestrichelte Linie in Bild 11 gezeigt werden. Das besondere Verhalten der ionitrierten Proben beruht vermutlich auf der geringen Dicke der in geschmierten Zustand günstigeren Verbindungsschicht und ist nur dann als verfahrensbedingt an-

zusehen, wenn man beim Ionitrieren grundsätzlich keine dickere Verbindungsschichten erzeugen kann.

Kunst:

Bei Bild 14 wird das Profildiagramm von J 2 so interpretiert, daß fast kein Verschleiß außer einer Riefe eingetreten ist. Diese Feststellung erscheint fragwürdig. Im Gegenteil dürfte das Profildiagramm von J 2 doch ungünstiger aussehen als das beispielsweise von G 2, B 1 oder B 2.

Antwort:

Planimetriert man die Profildiagramme von Bild 14 aus, so erkennt man in Bild 16 a, daß der Verschleißbetrag der ionitrierten Scheiben tatsächlich kleiner als der von G 2, B 1 und B 2 ist.

Kunst:

Das in Bild 15 niedergelegte Ergebnis, daß bei den badnitrierten Proben infolge Fressens in der Diffusionszone der Versuch abgebrochen werden mußte, widerspricht allen praktischen Erfahrungen. Trifft diese Feststellung zu, setzt das doch wohl voraus, daß die Stickstoffverteilung in der Matrix beim Badnitrieren anders ist als beim Gasnitrieren. Das hätte jedoch bereits im Härteverlauf deutlich erkennbar sein müssen.

Antwort:

Das Fressen der badnitrierten Proben war unter den gegebenen Bedingungen reproduzierbar. Über die Stickstoffverteilung in der Matrix konnten hier keine Untersuchungen gemacht werden. Dazu müßte die Stickstoffverteilung in Richtung der Diffusion und senkrecht zu ihr gemessen werden. In gleicher Weise müßten Härtemessungen durchgeführt werden.

Kunst:

Beim Punkt 2 der Zusammenfassung ist völlig unklar, woraus der Verfasser diese Feststellung nimmt. Aus Bild 6 kann sie nicht stammen, da dort bei J 1 die Verbindungsschicht sehr schnell durchgeschliffen ist. Bei J 2 ist das Verschleißverhalten nicht besser als bei den anderen Verfahren. Auch aus Bild 7 kann diese Feststellung nicht entnommen werden, da die Verbindungsschicht in allen Fällen durchgeschliffen ist, wie aus der Stifflängenabnahme hervorgeht. Auch Bild 10 kann dafür nicht herangezogen werden, da hierbei J 1 und J 2 gleiches Verhalten zeigen wie z. B. G 1 und B 2. Schließlich kann auch aus Bild 11 hierzu nichts entnommen werden, da bei der Probe J 1 nur zwei Werte eingezeichnet sind, alle anderen aber nach Aussage des Verfassers schlechtere Werte liefern und weit oberhalb des Diagramms liegen. Auch hierbei ist im übrigen die Verbindungsschicht bereits durchgeschliffen. Allenfalls könnte aus Bild 16 die vom Verfasser in Punkt 2 der Zusammenfassung gemachte Feststellung entnommen werden. Allein aufgrund dieses einen Bildes erscheint bei Berücksichtigung der bereits vorher erwähnten Streuungen diese Feststellung jedoch ganz eindeutig zu weit zu gehen.

Antwort:

Die Feststellung 2) der Zusammenfassung, daß die γ' -Phase der ionitrierten Proben nicht schlechter als die ϵ -Phase der anderen Proben abschneidet, beruht auf Bild 10 a. Die Aus-

sage, daß sie eher einen höheren Verschleißwiderstand hat, geht aus Bild 16 a hervor. Diese Beobachtung wird von Mahler in der unter Punkt 6 der Diskussionsbemerkungen zitierten Arbeit bestätigt.

Kunst:

Auch die in der Zusammenfassung, Punkt 3, gemachte Feststellung, daß eine dünne Verbindungsschicht Vorteile hat, weil nach deren Verschleiß die Ausscheidungszone einen höheren Verschleißwiderstand hat, erscheint durch die Versuche nicht hinreichend belegt.

Antwort:

Diese Feststellung wurde vom Verfasser so allgemein nicht gemacht. Eine dünne Verbindungsschicht hat nur dann Vorteile, wenn die Adhäsion zwischen den Verschleißpartnern gering ist. Der dann gegebene Vorteil einer dünnen Verbindungsschicht geht eindeutig aus Bild 7 hervor, in dem die ionitrierten (J 1, J 2) und die gasnitrierten Proben (G 1) mit den dünneren Verbindungsschichten bei höheren Belastungen einen relativ niedrigen Verschleißbetrag haben, eben weil die Verbindungsschicht schnell abgetragen wird, so daß der durch Bild 10 b belegte höhere Verschleißwiderstand der Ausscheidungszone zum Tragen kommen kann.

N. N. 2):

Wir sind über den Härtewert der mit B 1 bezeichneten nitrierten Scheiben mit 42 mm Durchmesser überrascht. In Tabelle 1 auf Seite 9 wird eine Härte von 372 HV 0,05 angegeben, die für eine Nitridschicht sehr gering ist. Möglicherweise ist dies dadurch zu erklären, daß die Verbindungsschicht aus zwei Bereichen besteht. In den oberflächennahen Bereichen, die 1/4 der gesamten Dicke ausmachen, ist eine gewisse Porosität vorhanden. Darunter befindet sich eine kompakte Schicht, die 3/4 der Gesamtdicke ausmacht. Beträgt bei der Härteprüfung die Prüfkraft nur 50 p, so wird nur die poröse Oberflächenzone erfaßt. Würde man die Härte der kompakten Schicht prüfen, so würde man sicher einen höheren Härtewert erhalten.

Antwort:

Auch wir sind der Ansicht, daß die relativ geringe Härte der mit B 1 bezeichneten Proben wahrscheinlich auf die Porosität der oberflächennahen Bereiche zurückzuführen ist.

N. N.:

Die Porosität an der Oberfläche geht natürlich auch in die Verschleißergebnisse von Bild 8 und Bild 10 a ein. Bild 8 zeigt, daß der Verschleiß der Scheiben B 1 bis zu einer maximalen Tiefe von 8 μm reicht. Von diesen 8 μm gehören 3 . . . 4 μm dem porösen Bereich an, in dem der Verschleiß größer als in der darunterliegenden Zone ist. Es ist daher wahrscheinlich, daß die Ergebnisse anders gewesen wären, wenn der Gleitweg größer als 2,5 km gewesen wäre.

Antwort:

Wir haben die gleichen Verschleißuntersuchungen auch für einen längeren Gleitweg von 5 km gemacht. Auf die Wiedergabe der Ergebnisse haben wir verzichtet, weil sie die Aussagen von Bild 8 und Bild 10 a im wesentlichen bestätigen. Auch dort schnitten die mit B 1 bezeichneten Proben nicht günstiger als die anderen Proben ab.

N. N.:

In Bild 11 ist eine gewisse Streuung der Meßwerte für die

2) St.-Etienne, Frankreich

Proben B 1 festzustellen. Diese Streuung, die wir niemals beobachtet haben, beruht wahrscheinlich darauf, daß die Proben vor der Verschleißprüfung poliert wurden. Die Verbindungsschicht B 1 enthält nämlich Eisensulfid. Es ist bekannt, daß Eisensulfid eine wichtige Rolle beim Gleiten mit Schmierung spielt. Nun ist es aber sehr schwer, beim Polieren mit einem Tuch oder einer abrasiven Paste die Entfernung von Eisensulfid zu kontrollieren. Wahrscheinlich wären die Ergebnisse besser gewesen, wenn man die Proben vorher nicht poliert hätte.

Antwort:

Wir haben alle Proben geläppt bzw. kurzzeitig (5 sec) vor-

sichtig geschliffen, um eine annähernd einheitliche Rauhtiefe zu erhalten; denn der Verschleiß hängt bekanntlich stark von der Rauhtiefe ab. Wie aus Tabelle 2 auf Seite 9 hervorgeht, lag die Rauhtiefe R_z der Proben B 1 relativ hoch, so daß im unpolierten Zustand sich möglicherweise wegen der großen Rauhtiefe ein hoher Verschleißbetrag ergeben hätte.

N. N.:

Wir möchten darauf hinweisen, daß es sich bei dem mit B 1 bezeichneten Nitrierverfahren auch um ein umweltfreundliches Verfahren handelt.

7. Tabellen

Tabelle 1

Nitrierbehandlungen und Eigenschaften der nitrierten Proben

Bez.	Verfahren	Stickstoff abgebendes Medium	Nitriertemp. [°C]	Nitrierdauer [h]	Abkühlung	Verbindungsschicht		
						Phase	Dicke [μm]	Härte HV 0,05
G 1	Gasnitrieren	NH ₃ (3.000 l/h) + Exogas (3.000 l/h)	570	2,5	Öl 70°C	ε	9,4 ± 1,3	810
G 2	Gasnitrieren	50 % NH ₃ + 50 % Exogas (6 % H ₂ , 6 % CO, 10 % CO ₂)	575	3	Wasser	ε	17,5 ± 2,7	583
B 1	Badnitrieren	Alkali-Cyanat-Karbonat-Bad + Schwefel	570	1,5 ³⁾ 2 ⁴⁾	Wasser/Öl	ε	14,3 ± 2,1	533 ¹⁾ 372 ²⁾
B 2	Badnitrieren	Natrium-Kalium-Cyanat- Karbonat-Bad + Regenerator	580 Vorwärmen auf 300°C	2	Öl/Heißwasser	ε	13,7 ± 2,0	715
I 1	Ionitrieren	NH ₃	500	36	langsam im Rezipienten	γ'	4,4 ± 0,9	900
I 2	Ionitrieren	N ₂ , H ₂ , CH ₄	560	4	langsam im Rezipienten	ε + γ' ³⁾ ε ⁴⁾	11,3 ± 0,9 ~6	1.044

1) Scheiben 70 φ 2) Scheiben 42 φ 3) Stifte 4) Scheiben

Tabelle 2

Rauhtiefe R_z* [μm] der Proben

Bez.	Stifte	Scheiben 42 φ	Scheiben 70 φ
G 1	1,27 ± 0,17	1,14 ± 0,09	1,38 ± 0,12
G 2	2,68 ± 0,33	1,63 ± 0,16	2,77 ± 0,38
B 1	2,75 ± 0,34	1,72 ± 0,09	2,00 ± 0,31
B 2	1,18 ± 0,20	1,31 ± 0,20	1,94 ± 0,49
I 1	2,58 ± 0,66	1,42 ± 0,34	1,98 ± 0,52
I 2	1,57 ± 0,09	1,16 ± 0,08	1,45 ± 0,20

a) nach dem Nitrieren

Bez.	Stifte			Scheiben 42 φ			Scheiben 70 φ		
	Bearbei- tung	Dauer	R _z [μm]	Bearbei- tung	Dauer	R _z [μm]	Bearbei- tung	Dauer	R _z [μm]
G 1	Schleifen mit Papier Körnung 600	5''	0,79 ± 0,17	Läppen mit Pulver Körnung 1.900	1'	1,03 ± 0,08	Läppen mit Pulver Körnung 1.900	1'	1,20 ± 0,06
G 2		5''	0,90 ± 0,20		4'	1,36 ± 0,06		4'	1,73 ± 0,38
B 1		5''	0,67 ± 0,15		4'	1,29 ± 0,10		4'	1,31 ± 0,07
B 2		5''	0,76 ± 0,19		1'	1,24 ± 0,08		2'	1,26 ± 0,05
I 1		5''	0,81 ± 0,13		30''	1,00 ± 0,12		1'	1,16 ± 0,09
I 2		5''	0,75 ± 0,14		20''	0,96 ± 0,07		1'	0,90 ± 0,06

b) nach dem Schleifen bzw. Läppen

Bez.	Proben für die Verschleißprüfungen ohne Schmierung		Proben für die Verschleißprüfungen mit Schmierung	
	Stifte	Scheiben 70 φ	Stifte	Scheiben 42 φ
G 1	0,94 ± 0,20	1,18 ± 0,05	0,71 ± 0,06	1,06 ± 0,07
G 2	1,09 ± 0,20	1,66 ± 0,13	0,75 ± 0,10	1,32 ± 0,04
B 1	0,70 ± 0,10	1,29 ± 0,03	0,58 ± 0,07	1,22 ± 0,04
B 2	0,58 ± 0,12	1,25 ± 0,04	0,68 ± 0,07	1,20 ± 0,07
I 1	0,87 ± 0,12	1,19 ± 0,08	0,76 ± 0,05	1,08 ± 0,14
I 2	0,77 ± 0,20	0,91 ± 0,07		

c) für die Verschleißprüfungen

* Meßlänge: 2,0 mm; cut off: 0,25 mm

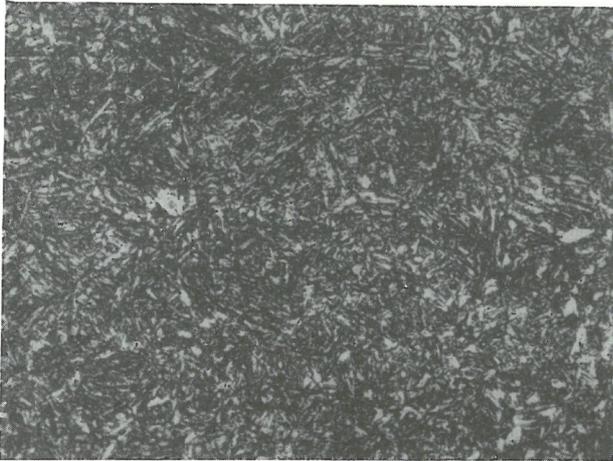
Tabelle 3
 Reibungskoeffizient und Temperaturerhöhung der Verschleißpaarungen ohne Schmierung

Paarung Stift/Scheibe	F_N [N]	v [m/s]	s [km]	μ_a	μ_e	$\Delta T_{\max.}$ [°C]
nitr./nitr.	0,5 . . . 5	0,1	1	$0,17 \pm 0,05$	$0,57 \pm 0,09$	4
bor./nitr. Verbindungs- schicht	5	0,5	2,5	$0,16 \pm 0,04$	$0,81 \pm 0,06$	14
bor./nitr. Ausscheidungs- zone	5	0,5	2,5	$0,16 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,03$	9

Tabelle 4
 Reibungskoeffizient und Temperaturerhöhung der Verschleißpaarungen unter Schmierung

Paarung Stift/Scheibe	F_N [N]	v [m/s]	s [km]	μ_a	μ_e	$\Delta T_{\max.}$ [°C]
nitr./nitr.	50 . . . 200	0,1	1	$0,13 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$	8
bor./nitr. Verbindungs- schicht	400	0,1	2,5	0,107	0,097	11
bor./nitr. Ausscheidungs- zone	400	0,1	2,5	0,107	0,123 (↑ 0,18)	13

8. Bilder



a) Gefüge

V = 500

Bild 1
Zustand der Proben vor dem Nitrieren

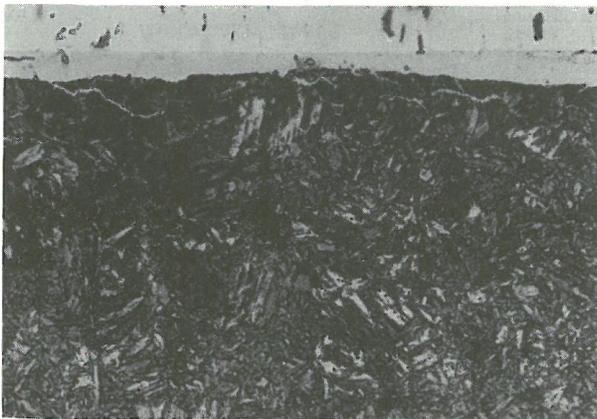
b) Härte HV 10

Stifte	Scheiben 42 ϕ	Scheiben 70 ϕ
299	343	343

c) Rauhtiefe R_z^* [μm]

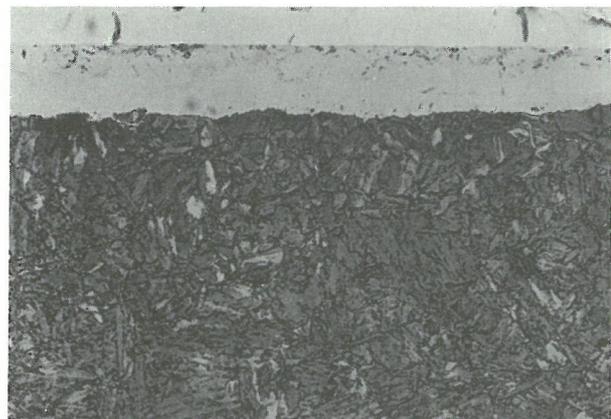
Stifte	Scheiben 42 ϕ	Scheiben 70 ϕ
$1,28 \pm 0,30$	$0,88 \pm 0,09$	$1,06 \pm 0,06$

* Meßlänge: 2 mm; cut off: 0,25 mm

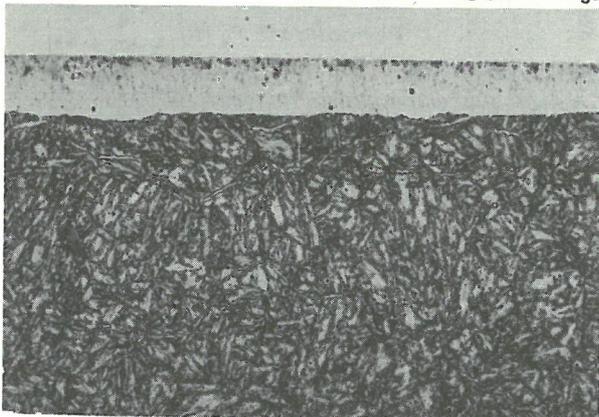


G 1

gasnitriert

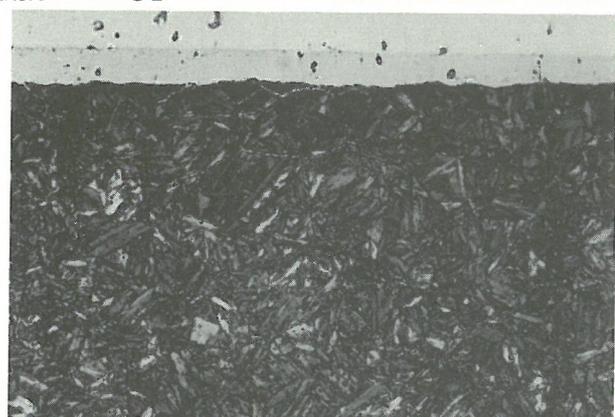


G 2

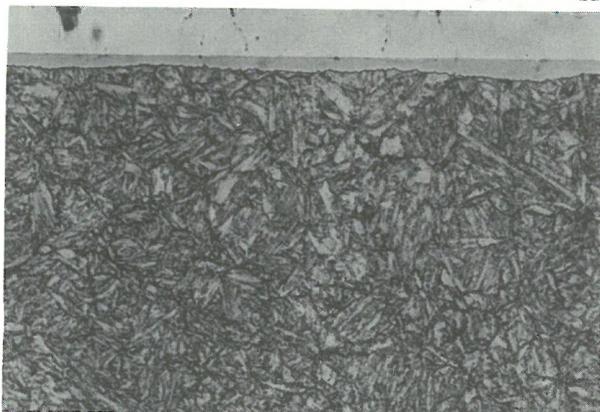


B 1

badnitriert

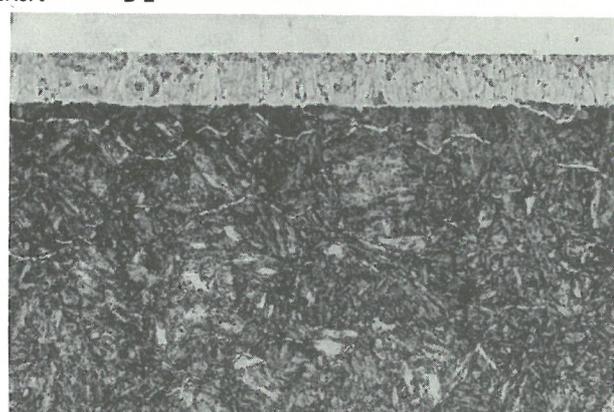


B 2



I 1

ionitriert



I 2

Bild 2
Gefügebilder von unterschiedlich nitrierten Stahlproben aus 42 CrMo 4 ($V = 500$; Ätzung: 15 . . . 30'' in 0,5 %iger alkohol. HNO_3)

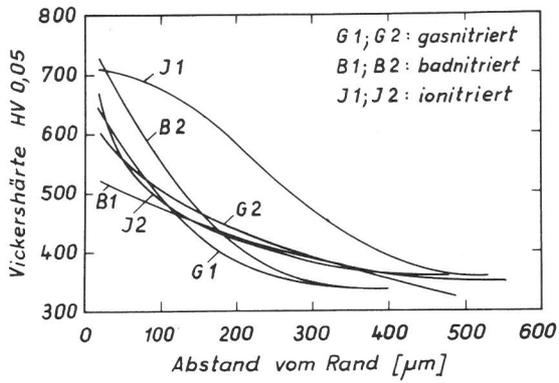


Bild 3
Härteverlauf in der Ausscheidungszone von unterschiedlich nitrierten Proben aus Stahl 42 CrMo 4

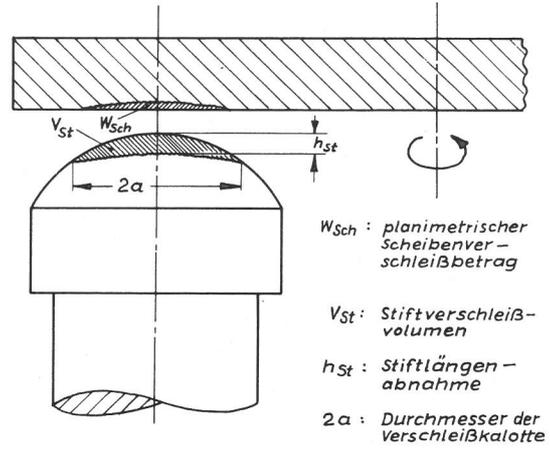


Bild 5
Schematische Darstellung der gemessenen Verschleißgrößen

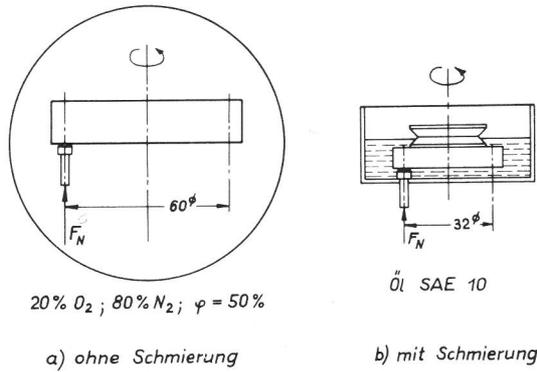


Bild 4
Stift-Scheibe-Verschleißprüfsystem

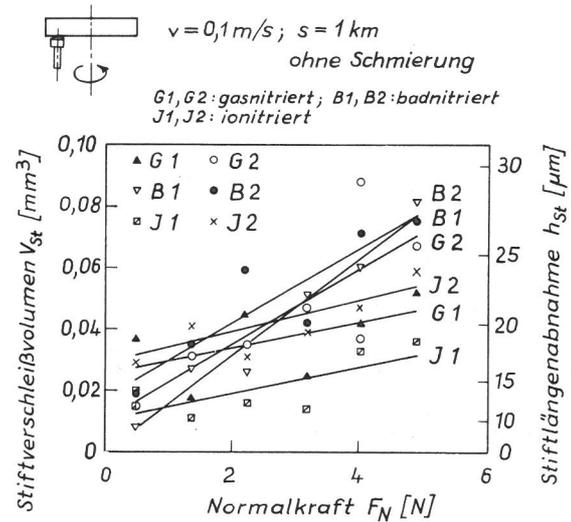


Bild 7
Verschleiß von unterschiedlich nitrierten Stiftproben aus Stahl 42 CrMo 4

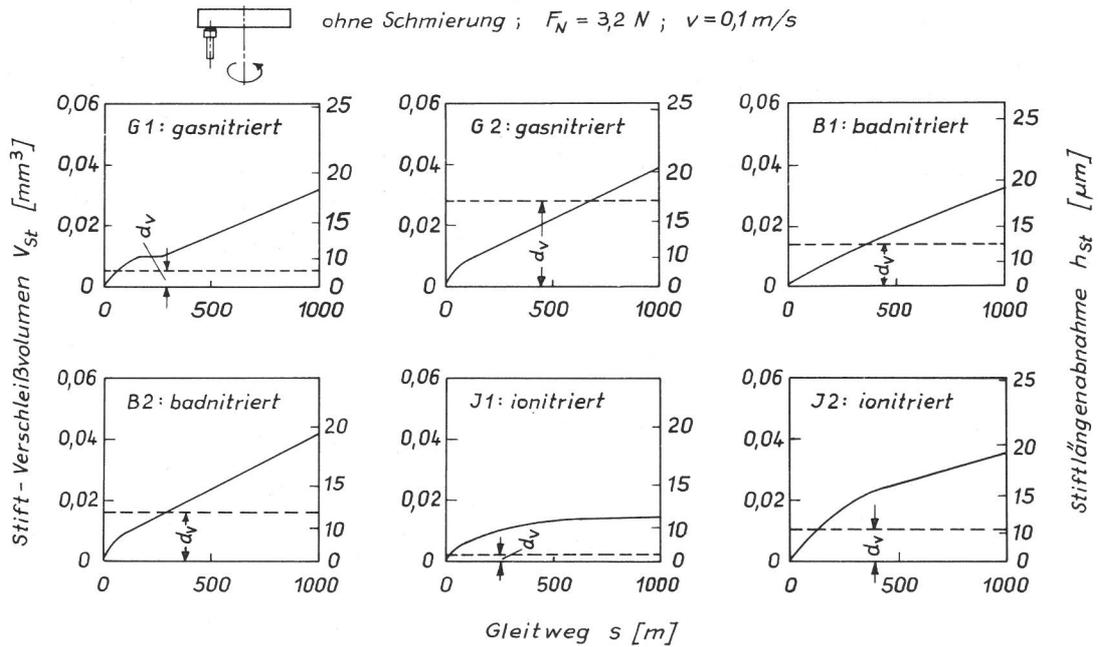


Bild 6
Verschleiß von unterschiedlich nitrierten Stiftproben aus Stahl 42 CrMo 4
(d_v : Dicke der Verbindungsschicht)

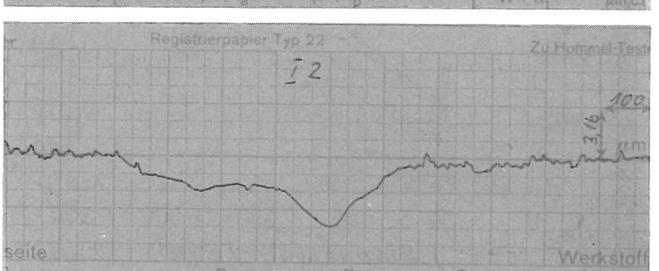
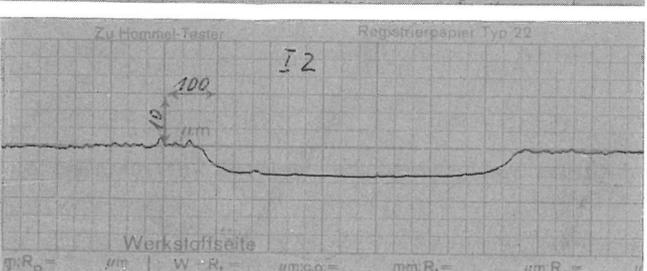
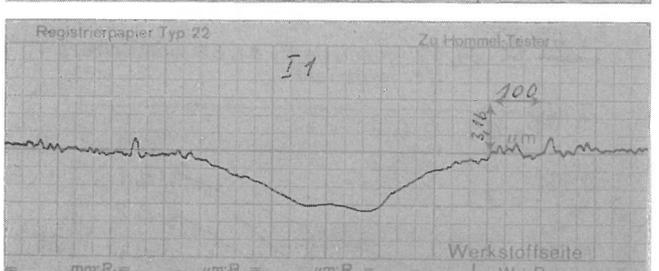
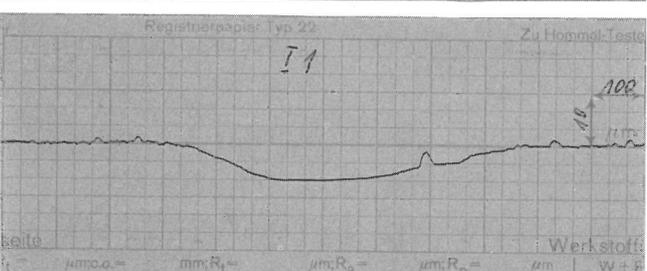
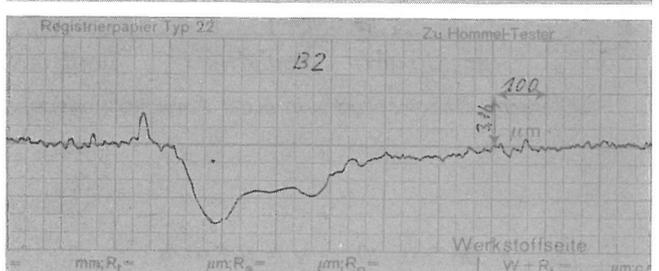
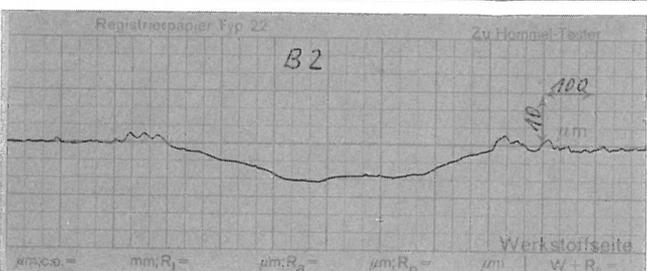
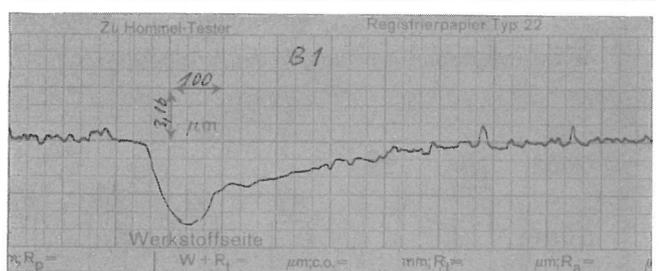
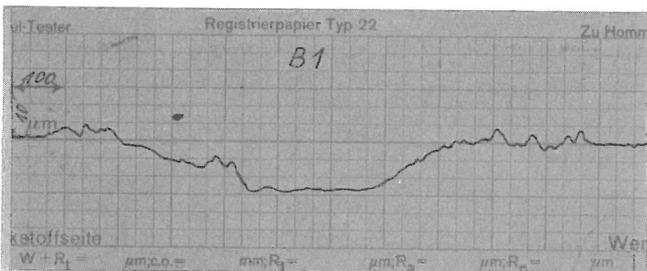
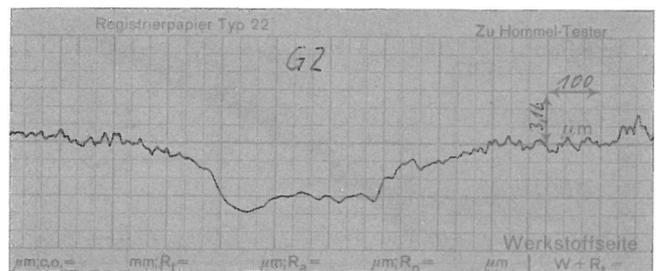
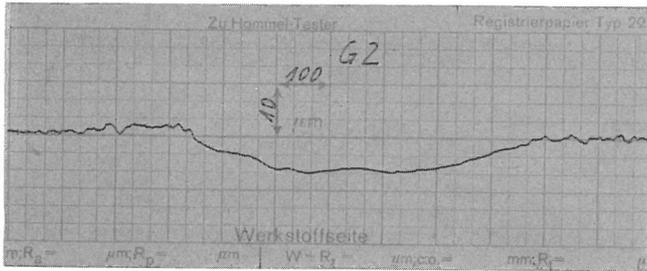
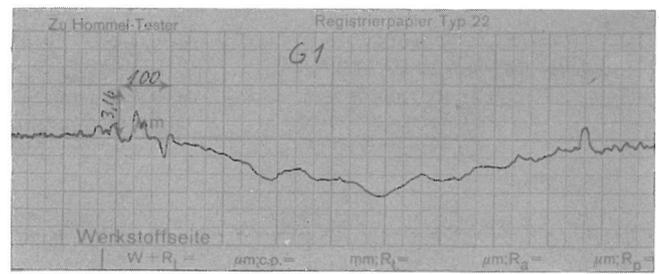
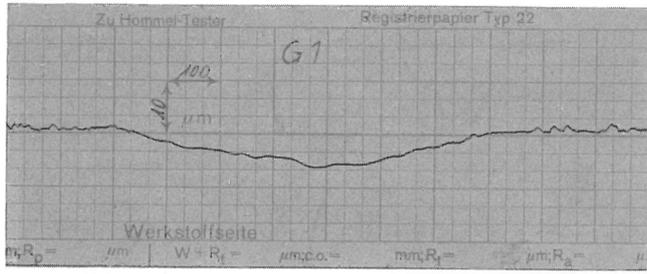


Bild 8
 Profildiagramme der Verschleißspuren von unterschiedlich nitrerten Scheiben aus 42 CrMo 4 (tribologische Beanspruchung in der Verbindungsschicht)

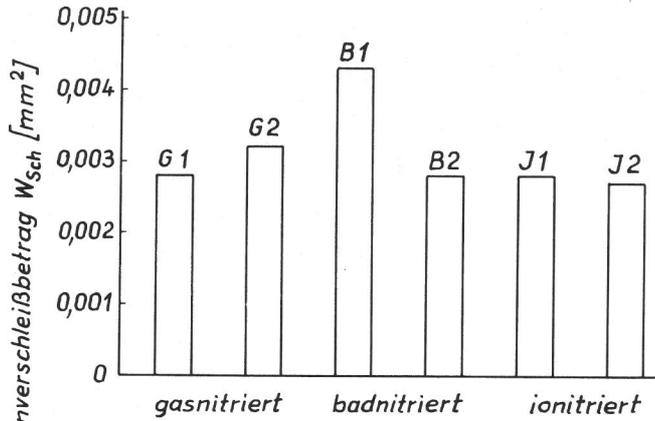
Stift	Scheibe	$F_N = 5 \text{ N}$
borierter/ nitrierter C 45	G 1, G 2: gasnitiert	$v = 0,5 \text{ m/s}$
	B 1, B 2: badnitiert	$s = 2,5 \text{ km}$
	I 1, I 2: ionitriert	ohne Schmierung

Bild 9
 Profildiagramme der Verschleißspuren von unterschiedlich nitrerten Scheiben aus 42 CrMo 4 (tribologische Beanspruchung in der Ausscheidungsschicht)

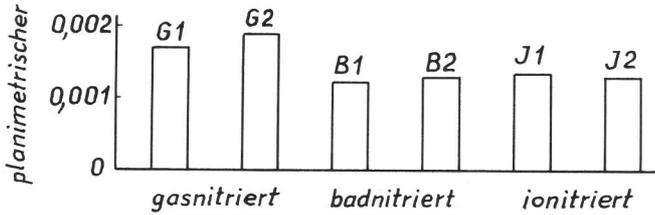
Stift	Scheibe	$F_N = 5 \text{ N}$
borierter C 45/ nitrierter C 45	G 1, G 2: gasnitiert	$v = 0,5 \text{ m/s}$
	B 1, B 2: badnitiert	$s = 2,5 \text{ km}$
	I 1, I 2: ionitriert	ohne Schmierung

Stift / Scheibe
 borierter C45/nitrierter 42CrMo4
 G1, G2: gasnitriert
 B1, B2: badnitriert
 J1, J2: ionitriert

$F_N = 5 N$
 $v = 0,1 m/s$
 $s = 2,5 km$
 ohne Schmierung

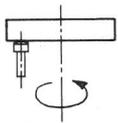


a) Verschleißbeanspruchung in der Verbindungsschicht



b) Verschleißbeanspruchung in der Ausscheidungszone

Bild 10
 Verschleiß von unterschiedlich nitrierten Scheiben-Proben aus Stahl
 42 CrMo 4



Öl: SAE 10 ; $v = 0,1 m/s$
 $s = 1 km$

G1, G2: gasnitriert; B1, B2: badnitriert
 J1: ionitriert

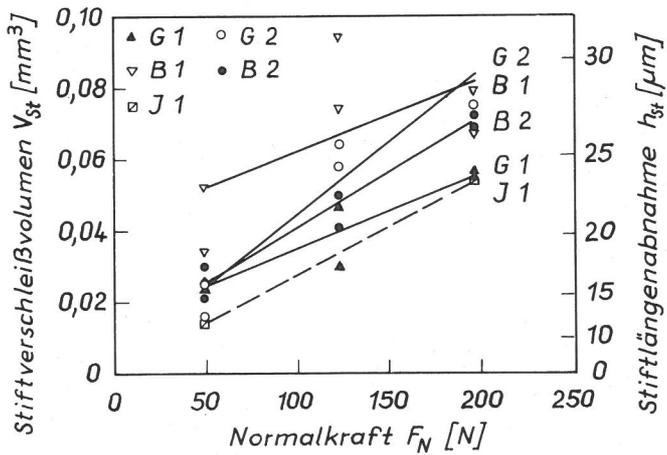
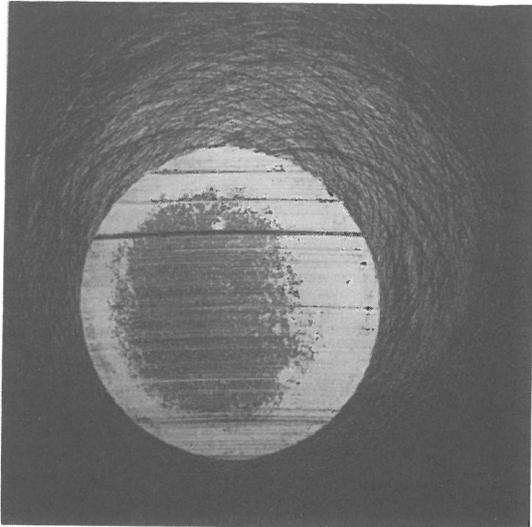
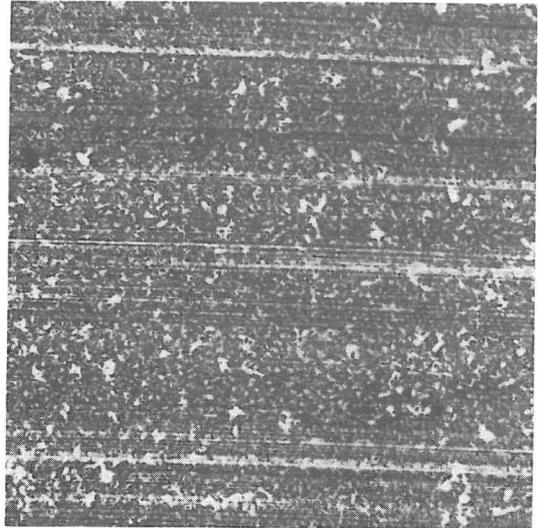


Bild 11
 Verschleiß von unterschiedlich nitrierten Stift-Proben aus Stahl
 42 CrMo 4

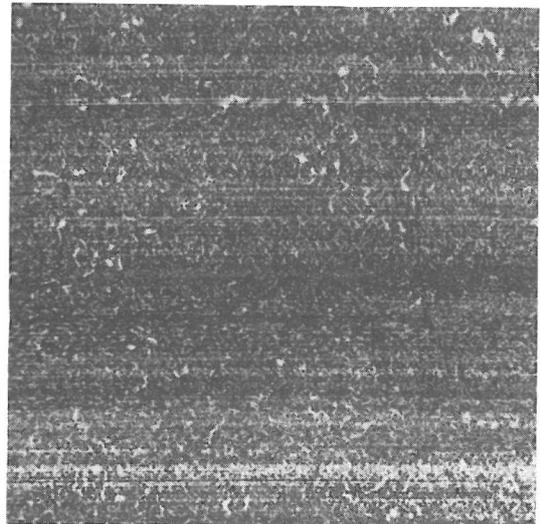
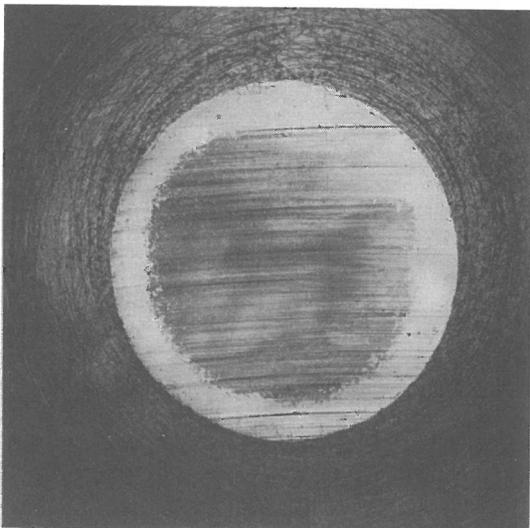
V = 21



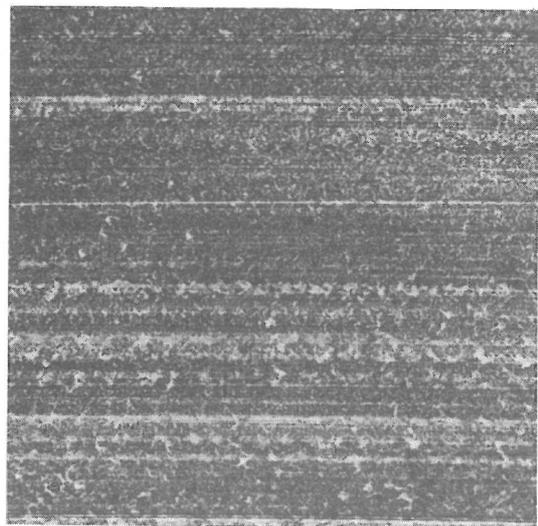
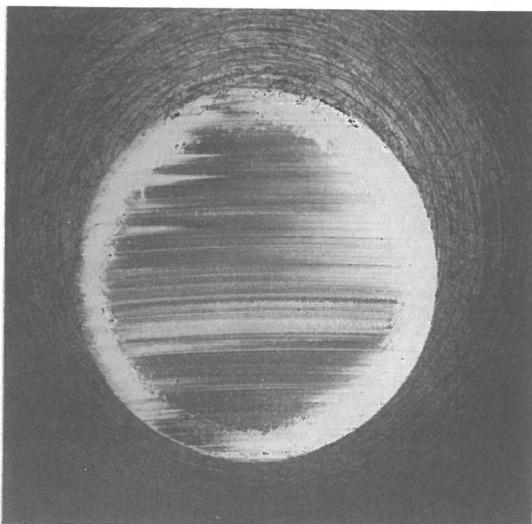
V = 160



$F_N = 49 \text{ N}$



$F_N = 123 \text{ N}$

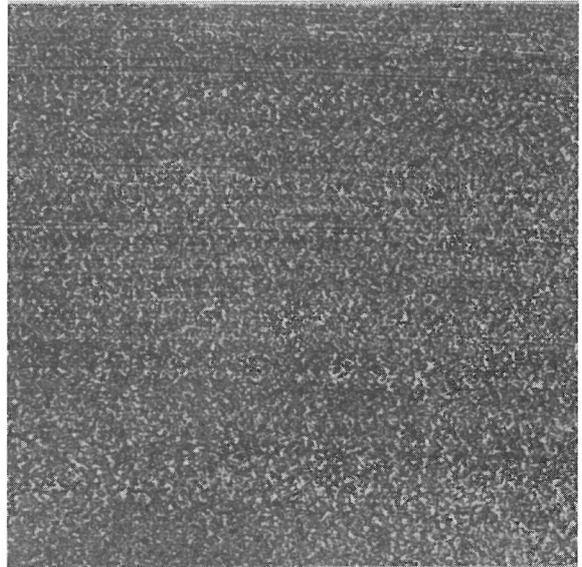
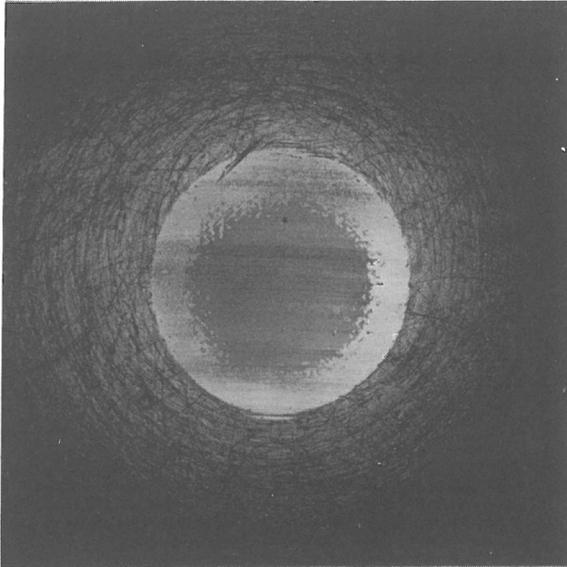


$F_N = 196 \text{ N}$

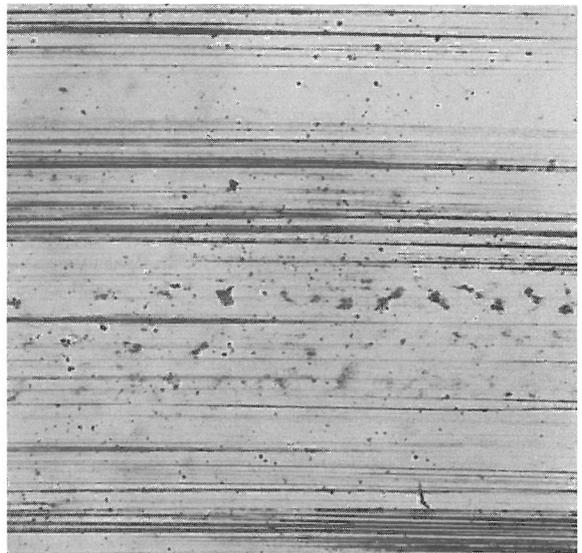
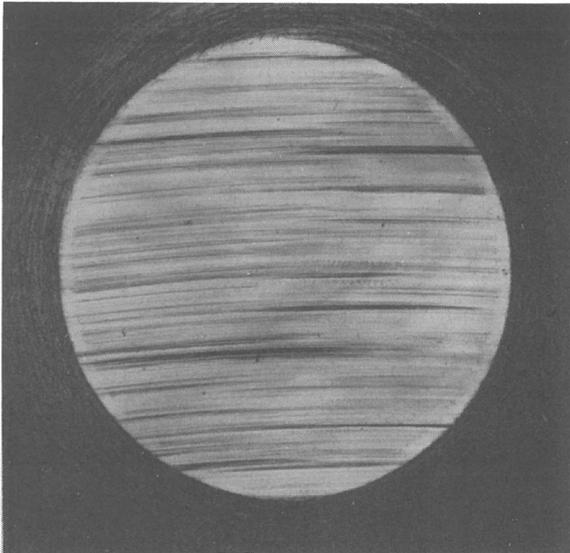
Bild 12
Versleißkalotten von gasnitrierten (G 1) Stiften ($v = 0,1 \text{ m/s}$; $s = 1 \text{ km}$)

V = 21

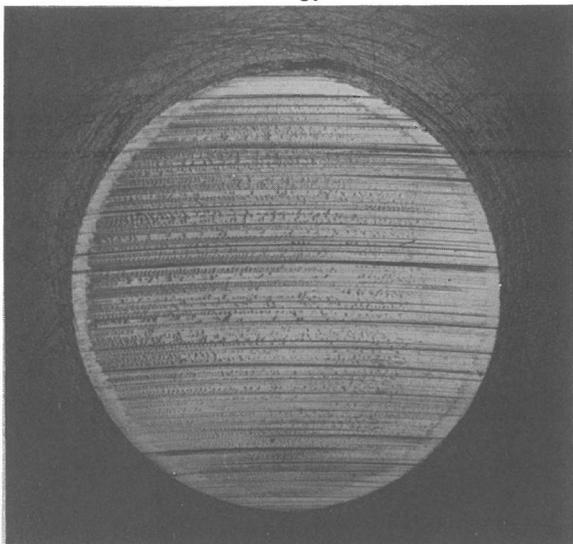
V = 160



a) $F_N = 49 \text{ N}$; $d_V = 7,0 \mu\text{m}$; $V_{St} = 0,014 \text{ mm}^3$



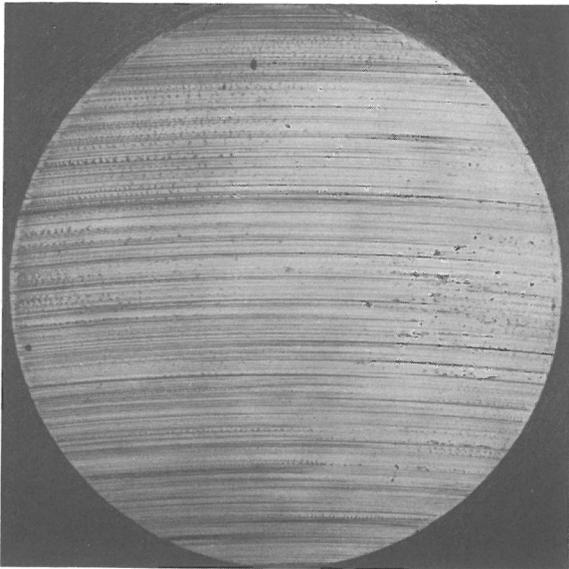
b) $F_N = 49 \text{ N}$; $d_V = 4,1 \mu\text{m}$; $V_{St} = 0,124 \text{ mm}^3$



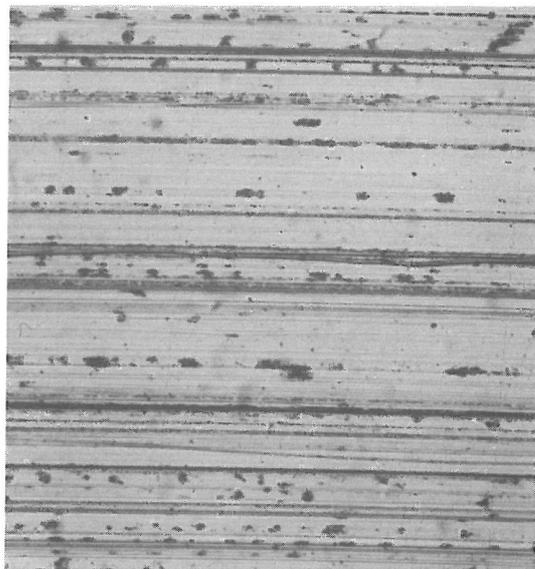
c) $F_N = 123 \text{ N}$; $d_V = 4,2 \mu\text{m}$; $V_{St} = 0,107 \text{ mm}^3$

Bild 13
Verschleißkalotten von ionitrierten (I 1) Stiften
($v = 0,1 \text{ m/s}$; $s = 1 \text{ km}$)

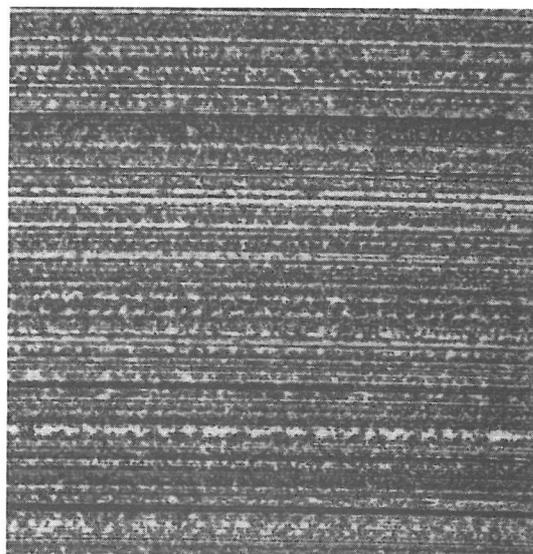
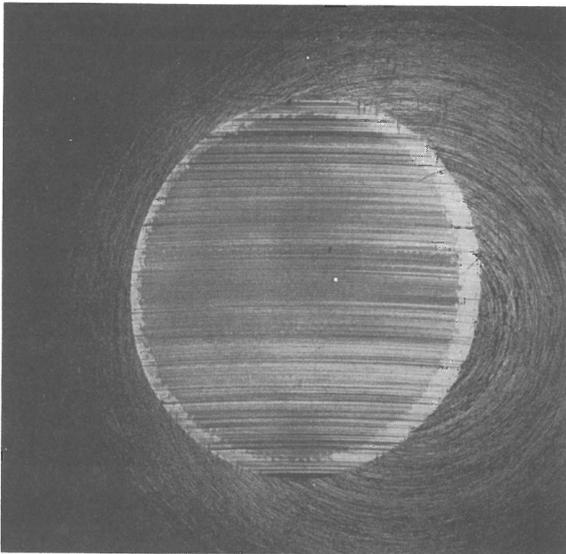
V = 21



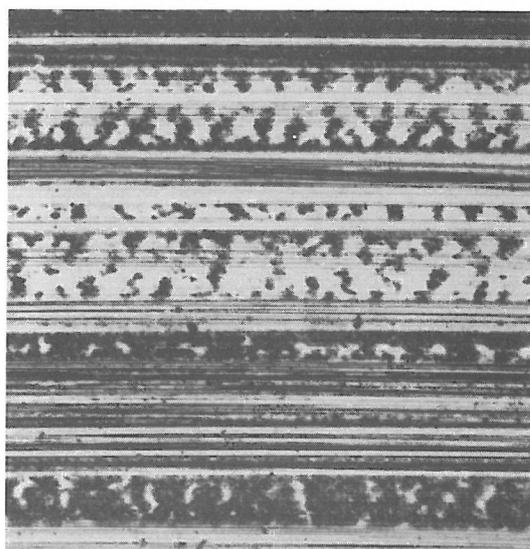
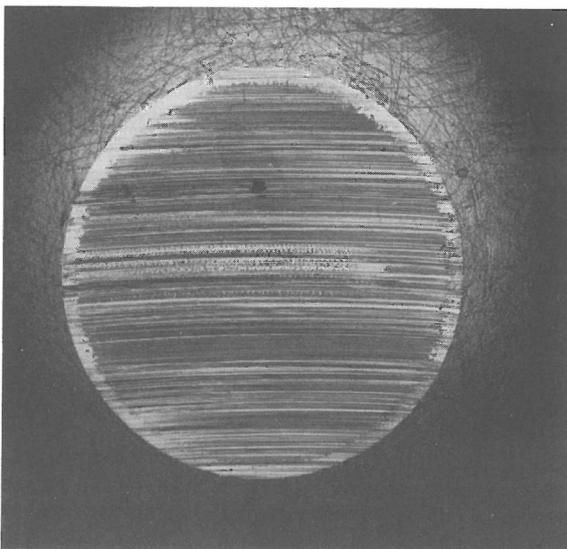
V = 160



d) $F_N = 123 \text{ N}$; $d_V = 2,7 \mu\text{m}$; $V_{St} = 0,287 \text{ mm}^3$

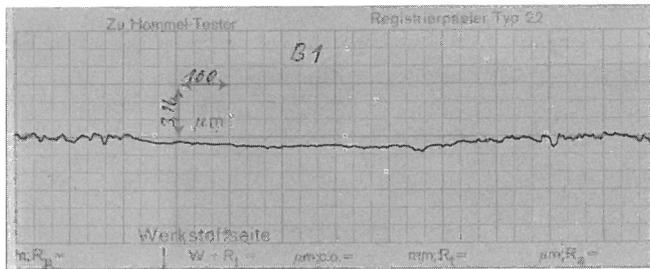
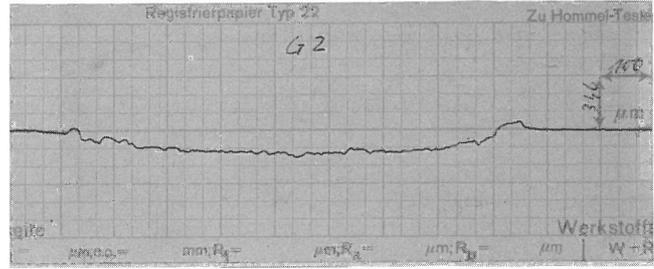
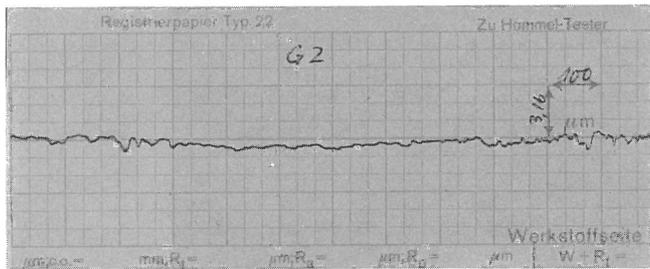
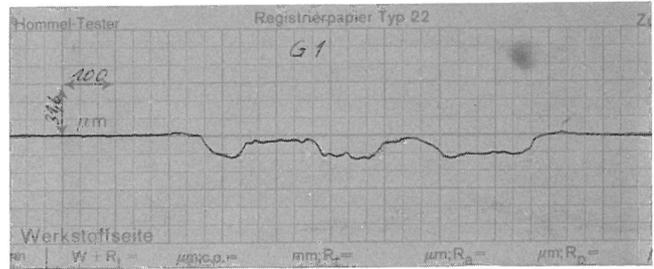


e) $F_N = 196 \text{ N}$; $d_V = 4,5 \mu\text{m}$; $V_{St} = 0,048 \text{ mm}^3$

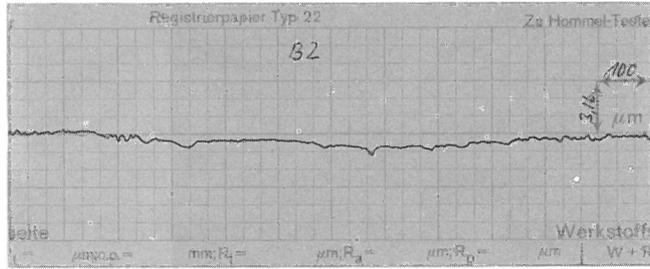


f) $F_N = 196 \text{ N}$; $d_V = 4,3 \mu\text{m}$; $V_{St} = 0,082 \text{ mm}^3$

Bild 13
Fortsetzung



B 1: vorzeitiger Abbruch des Prüflaufes



B 2: vorzeitiger Abbruch des Prüflaufes

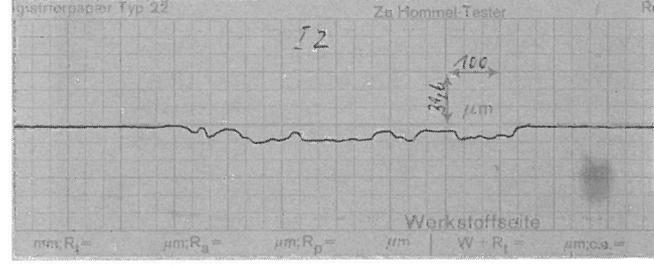
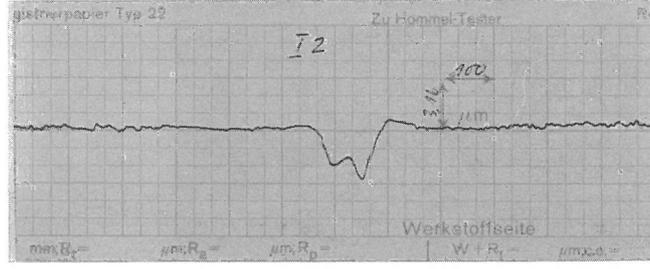
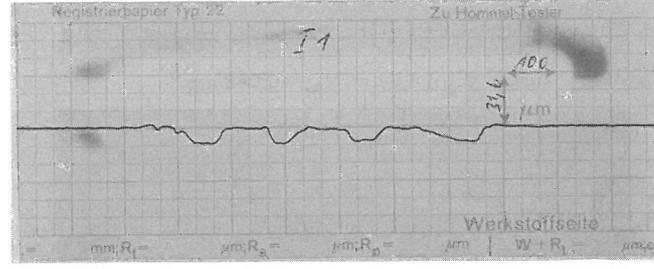
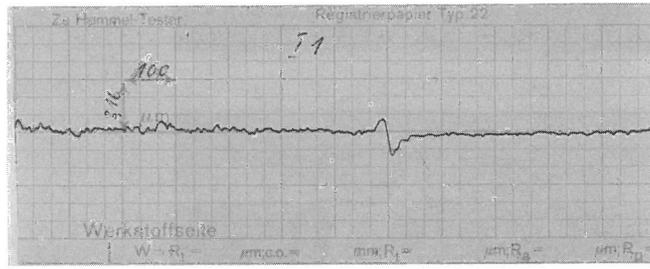


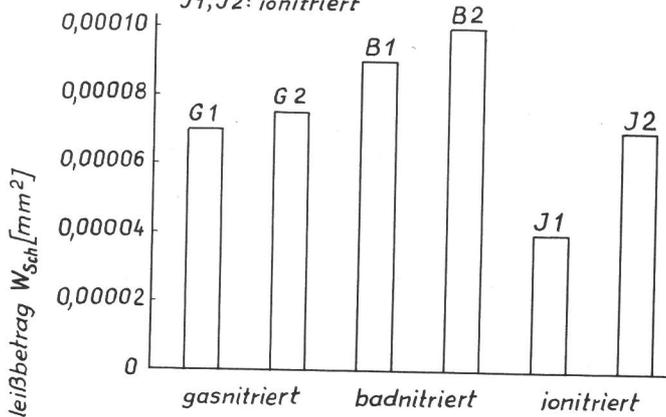
Bild 14
 Profildiagramme der Verschleißspuren von unterschiedlich nitrierten Scheiben aus 42 CrMo 4 (tribologische Beanspruchung in der Verbindungsschicht)

Stift	Scheibe	Öl SAE 10 W
borierter/ 42 CrMo 4	nitrierter 42 CrMo 4 G 1, G 2: gasnitriert B 1, B 2: badnitriert I 1, I 2: ionitriert	$F_N = 400 \text{ N}$ $v = 0,1 \text{ m/s}$ $s = 2,5 \text{ km}$

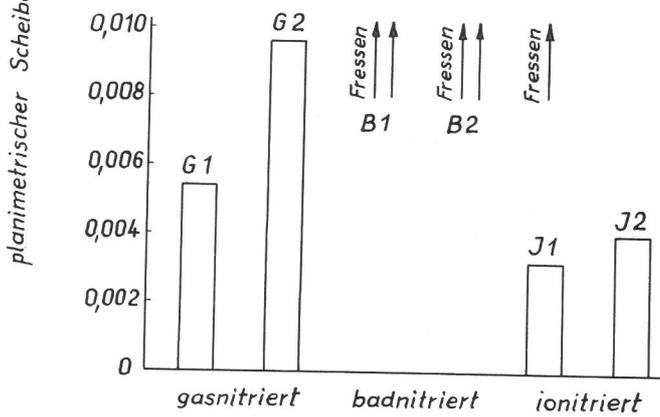
Bild 15
 Profildiagramme der Verschleißspuren von unterschiedlich nitrierten Scheiben aus 42 CrMo 4 (tribologische Beanspruchung in der Ausscheidungsschicht)

Stift	Scheibe	Öl SAE 10 W
borierter/ 42 CrMo 4	nitrierter 42 CrMo 4 G 1, G 2: gasnitriert B 1, B 2: badnitriert I 1, I 2: ionitriert	$F_N = 400 \text{ N}$ $v = 0,1 \text{ m/s}$ $s = 2,5 \text{ km}$

Stift / Scheibe
 borierter 42CrMo4/nitrierter 42CrMo4
 Öl : SAE 10 W
 $F_N = 400\text{ N}$
 $v = 0,5\text{ m/s}$
 $s = 2,5\text{ km}$
 G1, G2: gasnitriert
 B1, B2: badnitriert
 J1, J2: ionitriert



a) Verschleißbeanspruchung in der Verbindungsschicht



b) Verschleißbeanspruchung in der Ausscheidungszone

Bild 16
 Verschleiß von unterschiedlich nitrierten Scheiben-Proben aus Stahl 42 CrMo 4

9. Anhang

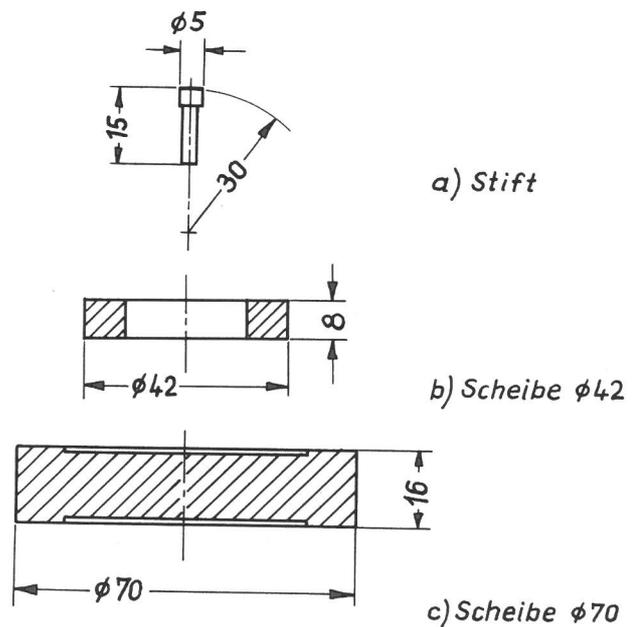


Bild I
 Abmessungen der Proben

