

Über den Temperaturanstieg von Zähnen von Kunststoffzahnradern (2. Bericht) : Über die Gleichgewichtstemperatur von Zähnen von Kunststoffzahnradern

著者	TAKANASHI Saburo, SHOJI Akira
journal or publication title	Science reports of the Research Institutes, Tohoku University. Ser. A, Physics, chemistry and metallurgy
volume	28
number	1
page range	103-115
year	1979-12-05
URL	http://hdl.handle.net/10097/28091

Über den Temperaturanstieg von Zähnen von Kunststoffzahnradern (2. Bericht)

Über die Gleichgewichtstemperatur von Zähnen von Kunststoffzahnradern

Saburo TAKANASHI und Akira SHOJI*

Forschungsinstitut für Wissenschaftlicher Messung

(Eingegangen am 4. Dezember 1978)

Synopsis

In the case of a plastic gear meshed with a steel pinion, the calculation formulas of the two kinds of heat quantities, generated in a plastic gear tooth and emitted from a rotating high temperature plastic gear tooth to atmosphere were deduced. Furthermore, the calculation formula of the equilibrium temperature of a plastic gear tooth was deduced. And by using these formulas, the equilibrium temperatures were calculated in some examples.

On the other hand, by using a power absorption type gear testing machine, the test gears were driven in the same conditions as above mentioned examples, and the equilibrium temperatures of plastic test gears were measured.

In comparison of calculation values of equilibrium temperatures with experimental values, both showed comparatively good coincidence.

I. Einleitung

Beim Entwurf von Kunststoffzahnradern wird genau wie bei normalen Zahnradern die Festigkeit von Zahnfuß und Zahnflanke berücksichtigt, aber zusätzlich muß als spezieller Punkt für Kunststoffzahnradern der Temperaturanstieg berücksichtigt werden, wobei dieses Problem sogar zu allererst, vor der Betrachtung der Festigkeit von Zahnfuß und Zahnflanke, betrachtet werden muß. Je nach diesem Temperaturanstieg unterscheiden sich nämlich die mechanischen Festigkeiten, die für den Entwurf der Festigkeit von Zahnfuß und Zahnflanke verwendet werden. Für den Temperaturanstieg von Kunststoffzahnradern sind zwei Probleme zu betrachten. Das eine Problem ist die durchschnittliche Gleichgewichtstemperatur der Zähne von Kunststoffzahnradern, das andere ist der momentane Temperaturanstieg der Zahnflanken von Kunststoffzahnradern. Der erste Wert ist wichtig für die Erfassung der beim Entwurf von Kunststoffzahnradern zu berücksichtigenden mechanischen Festigkeit und für die Festlegung des Flankenspiels, während der letztere Wert ein wichtiges Problem für die Bestimmung der Verwendungsgrenze von Kunststoffzahnradern in Bezug auf Kerbung der Zahnflanken usw. darstellt. Dieser Bericht behandelt die durchschnittliche Gleichgewichtstemperatur der Zähne von Kunststoffzahnradern.

* Miyagi Technical College

II. Über die durch das Eingreifen von Kunststoffzahnradern erzeugte Wärmemenge

Wenn z.B. ein Kunststoffzahnrad sich im Eingriff mit einem Stahlzahnrad befindet, so kann die an den Zähnen des Kunststoffzahnrades erzeugte Wärmemenge als aufgeteilt in eine auf der Reibung der Zahnflanken basierende Wärmemenge und eine durch die Viskoelastizität des Kunststoffmaterials erzeugte Verbrauchswärme betrachtet werden.

Die Reibungswärmemenge h_F (cal) ist

$$h_F = \frac{1}{42.7} \mu \cdot \beta \cdot P_n \cdot |v_p - v_s| \cdot t \quad (1)$$

Hierbei ist μ der Reibungskoeffizient zwischen den Zahnflanken, β ist das Lastverteilungsverhältnis, P_n ist die Zahnflankenbelastung (kg/cm), $|v_p - v_s|$ ist die Zahnflankengleitgeschwindigkeit (cm/sec), und t ist die Eingriffszeit eines Zahnpaars (sec). Diese Reibungswärmemenge h_F verteilt sich auf das Kunststoffzahnrad und das Stahlzahnrad, wobei das auf das Kunststoffzahnrad entfallende Verhältnis α_p durch die folgende Formel ausgedrückt werden kann.

$$\alpha_p = \frac{T_s - T_p + K \cdot q_0 \cdot \sqrt{b} \frac{1}{\sqrt{\lambda_p \cdot \gamma_p \cdot c_p \cdot v_p}}}{K \cdot q_0 \cdot \sqrt{b} \left(\frac{1}{\sqrt{\lambda_s \cdot \gamma_s \cdot c_s \cdot v_s}} + \frac{1}{\sqrt{\lambda_p \cdot \gamma_p \cdot c_p \cdot v_p}} \right)} \quad (2)$$

Hierbei ist T_s die Zahntemperatur des Stahlzahnrades, T_p ist die Zahntemperatur des Kunststoffzahnrades, K ist eine Konstante, λ , γ , c und v sind Wärmeleitzahl (kg.cm/cm.sec. °C), Dicht (kg/cm³), spezifische Wärme (kg.cm/kg. °C) und Bewegungsgeschwindigkeit des Zahnflankeneingriffspunkts (cm/sec), und die Indizes p und s bezeichnen die Werte für Kunststoffzahnrad (p) und Stahlzahnrad (s). b ist die Hälfte der Berührungsbreite beider Zahnflanken (cm), und q_0 hat den in der folgenden Formel gezeigten Wert.

$$q_0 = \frac{3 \cdot \mu \cdot \beta \cdot P_n |v_p - v_s|}{4 \cdot b} \quad (3)$$

Dementsprechend wird der auf das Kunststoffzahnrad entfallende Anteil der Reibungswärmemenge H_F (cal) durch die folgende Formel ausgedrückt.

$$H_F = \alpha_p \cdot h_F \quad (4)$$

Für die Verbrauchswärmemenge H_C (cal) wird andererseits die folgende Überlegung angestellt. Wenn der Zahn des Kunststoffzahnrades wie in Bild 1 gezeigt als Voigt'sches viskoelastisches Modell betrachtet wird, so kommt es bei Einwirkung der Belastung P_n auf die Zahnflanke zu elastischer Verformung des Zahns, und gleichzeitig kommt es auch zu einer viskoelastischen Verformung. In diesem Fall wird die folgende Beziehung erhalten.

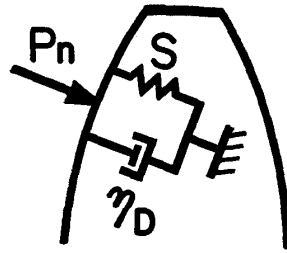


Bild 1. Voigt'sches Viskoelastisches Modell

$$P_n = S \cdot r + \eta_D \frac{dr}{dt} \quad (5)$$

Hierbei ist S der Federbeiwert des Zahns des Kunststoffzahnrad (cm/kg), η_D ist die Pufferviskosität (kg.sec/cm) und r ist die Durchbiegungsmenge (cm). Die die Formel (5) erfüllende Durchbiegungsmenge r wird durch die folgende Formel ausgedrückt.

$$r = \frac{P_n}{S} (1 - e^{-(S/\eta_D)t}) \quad (6)$$

Dementsprechend kann die Verbrauchswärmemenge H_c (cal), die beim Eingriff eines Zahnpaars während der Zeit t (sec) erzeugt wird, durch die folgende Formel ausgedrückt werden.

$$H_c = \int_0^t \eta_D \frac{dr}{dt} \frac{dr}{dt} dt = \frac{1}{42.7} \frac{\beta^2 \cdot P_n^2}{2 \cdot S} (1 - e^{-(2/\tau)t}) \quad (7)$$

In dieser Formel kann $\tau (= \eta_D/S)$ als die Verzögerungszeit (sec) des Kunststoffmaterials bezeichnet werden. Wenn das Verhältnis von Federbeiwert S (kg/cm) und Elastizitätsmodul E (kg/cm²) eines Kunststoffzahnrad ($= E/S$) mit q bezeichnet wird, so besteht der Zusammenhang $q = \eta/\eta_D$ zwischen der Pufferviskosität η_D und dem Viskositätsbeiwert η . Der Wert dieses q wird als Formfaktor bezeichnet.

Aus dem obigen Zusammenhang ergibt sich die bei einem Eingriff eines Zahnpaars eines Kunststoffzahnrad und eines Stahlzahnrad erzeugte Wärmemenge als $H_F + H_C$.

III. Mechanische Eigenschaften des Kunststoffmaterials

Um die durch das Eingreifen von Kunststoffzahnradern erzeugte Wärmemenge erfassen zu können, ist es erforderlich, für das verwendete Kunststoffmaterial den Elastizitätsmodul E , den Viskositätsbeiwert η , den Federbeiwert S eines Zahns des Kunststoffzahnrad usw. zu kennen. Um den Federbeiwert S eines Zahns zu erhalten, ist es erforderlich, die Biegungsmenge und die Annäherungsmenge zu kennen, wofür die Formeln von Timoshenko und Baud und von Caldwell verwendet werden, die verhältnismaßig gut mit den Meßergebnissen übereinstimmen. Die

Durchbiegungsmenge δ_{bs} (in) der Formel von Timoshenko und Baud wird durch die folgende Formel gegeben.

$$\delta_{bs} = \frac{4 \cdot P_n \cdot \cos \gamma}{E \cdot F} \left[3 \left(\frac{L}{h_0} \right) \left\{ 0.5 \left(3 - \frac{a}{L} \right) \left(\frac{a}{L} - 1 \right) + \log_e \frac{1}{a/L} \right\} + \frac{(1+\nu)(L-a)}{h_0(1+a/L)} \right] \quad (8)$$

In dieser Formel ist E der Elastizitätsmodul (psi), F ist die Zahnbreite (in), P_n ist die Zahnflankenbelastung (lb), ν ist das Poisson'sche Verhältnis, und die anderen Symbole sind wie in Bild 2 gezeigt. Das Trapezoid in dieser Bild ist durch gerad-

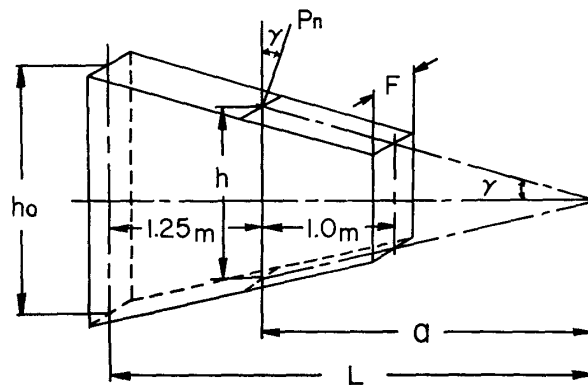


Bild 2. Angenähertes Zahnformmodell

linige Verbindung von Teilpunkt und Zahnkopfpunkt eines Zahns eines Kunststoffzahnrad erhalten.

Die Annäherungsmenge δ_c (in) der Formel von Caldwell wird durch die folgende Formel gegeben.

$$\delta_c = \frac{2(1-\nu^2)}{E \cdot F} \frac{P_n}{\pi} \left\{ \frac{2}{3} + \log_e \frac{1.731 \cdot E \cdot F \cdot C \cdot \cos \phi}{P_n} \right\} \quad (9)$$

In dieser Formel ist C der Achsenabstand beider Zahnräder (in), und ϕ ist der Eingriffswinkel.

Die von den Autoren untersuchten Materialien für Kunststoffzahnrad waren 6-Polyamid, MC-Polyamid und Delrin. Bild 3 zeigt die für die Messung des Elastizitätsmoduls verwendete Vorrichtung. Ein runder Kunststoffstab als Versuchsmaterial wird von einem Elektroofen eingehüllt, das obere Ende ist fest eingespannt, und das untere Ende wird über eine Lastzelle gezogen, und hierbei wird der Zusammenhang zwischen Belastung und Dehnung erhalten. Die Dehnung wird mit am runden Kunststoffstab angeklebten Dehnungsmesser gemessen. Die Ergebnisse sind in Bild 4 gezeigt. Bei 6-Polyamid und MC-Polyamid zeigt sich ein großer Temperatureinfluß, während sich bei Delrin in diesem Temperaturbereich praktisch kein Einfluß zeigt. Bild 5 zeigt die Vorrichtung zum Messen des

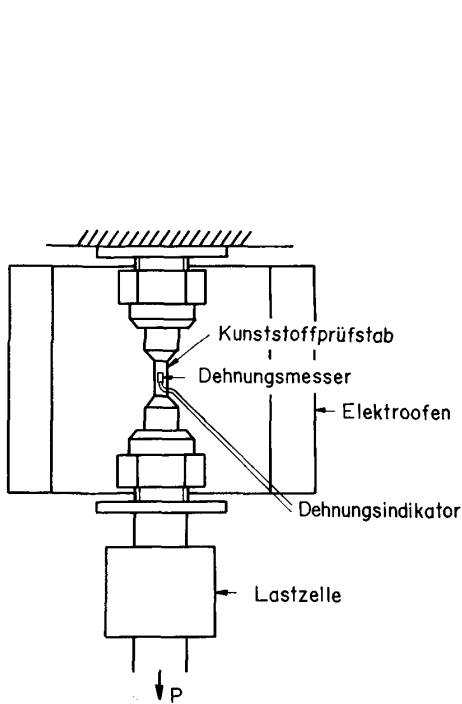


Bild 3.

Bild 3. Versuchseinrichtung zur Messung des Elastizitätskoeffizienten..

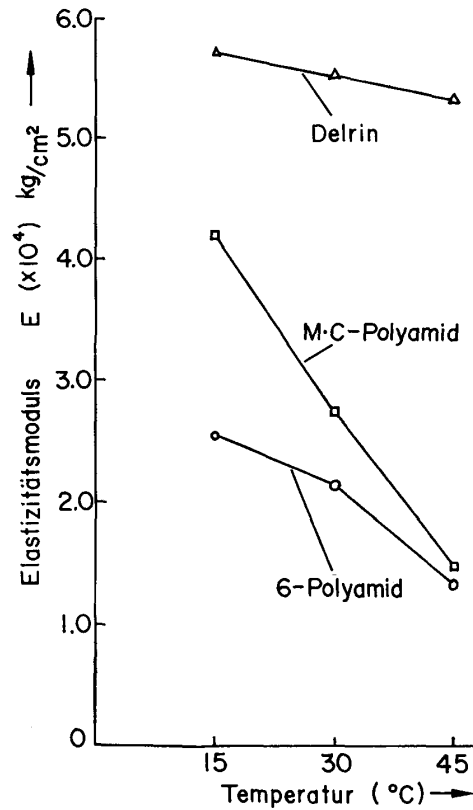


Bild 4.

Bild 4. Messergebnisse für den Elastizitätskoeffizienten

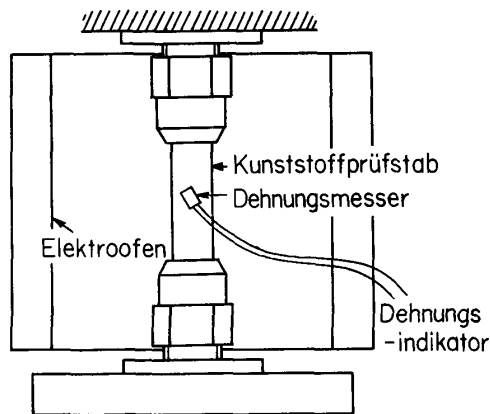


Bild 5. Versuchsausrüstung zur Messung des Viskositätskoeffizienten

Viskositätsbeiwert des Kunststoffmaterials. Das obere Ende eines runden Kunststoffstabes als Versuchsmaterial wird fest eingespannt, am unteren Ende wird eine Graugußscheibe angebracht, und durch Drehen dieser Scheibe werden im Rundstab Torsionsschwingungen hervorgerufen. Die Wellenform dieser Torsionsschwingungen wird durch Dehnungsmesser erhalten, die mit einer Neigung von 45° zur Rundstabachse angeklebt sind. Auch diese Versuchsmaterialien sind,

genau wie der vorherigen Versuchsanordnung, von einem Elektroofen umhüllt, um auf beliebige Temperaturen erhitzen zu können. Bild 6 zeigt als Beispiel die Wellenform der Torsionsschwingung eines Rundstabs aus 6-Polyamid. Die im

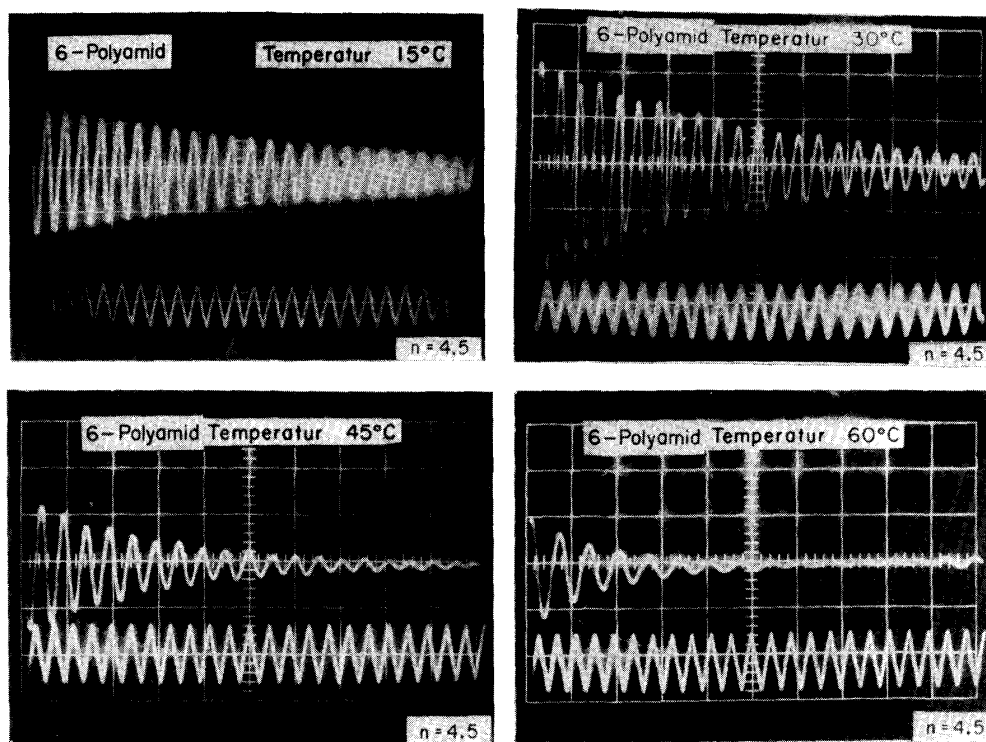


Bild 6. Oszilloskopkurven zur Anzeige der Torsionsschwingung

unteren Teil dieses Fotos gezeigte Wellenform ist die Wellenform von einem Pulsgenerator mit bekannter Frequenz, womit die Frequenz und die Periode der gemessenen Wellenform bestimmt werden. Das logarithmische Dekrement Δ wird aus dem Verhältnis a_1/a_2 der benachbarten Amplituden der Schwingungswellenform des Fotos als

$$\Delta = \log_e \frac{a_1}{a_2} \quad (10)$$

erhalten. Die Torsionsschwingung eines in Bild 5 gezeigten Rundstabs aus Kunststoffmaterial kann durch die folgende Formel ausgedrückt werden.

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + K \cdot \eta \frac{d\theta}{dt} + K \cdot G \cdot \theta = 0 \quad (11)$$

In dieser Formel ist I das Trägheitsmoment der Scheibe, θ ist der Drehungswinkel, G ist der Querelastizitätsmodul, K ist der Formbeiwert des Rundstabs und wird als I_P/l ausgedrückt, wobei I_P das Querschnittsekundärmoment des Versuchsrundstabs und l die Länge des Versuchsrundstabs ist. Aus dieser Formel wird der Viskositätsbeiwert η nach der folgenden Formel erhalten.

$$\eta = \frac{2 \cdot A \cdot I}{p \cdot K} \quad (12)$$

Dementsprechend kann der Viskositätsbeiwert durch Messung des logarithmischen Dekrements A und der Schwingungsperiode p erhalten werden. Bild 7 zeigt die Werte des Viskositätsbeiwert bei verschiedenen Temperaturen für die einzelnen

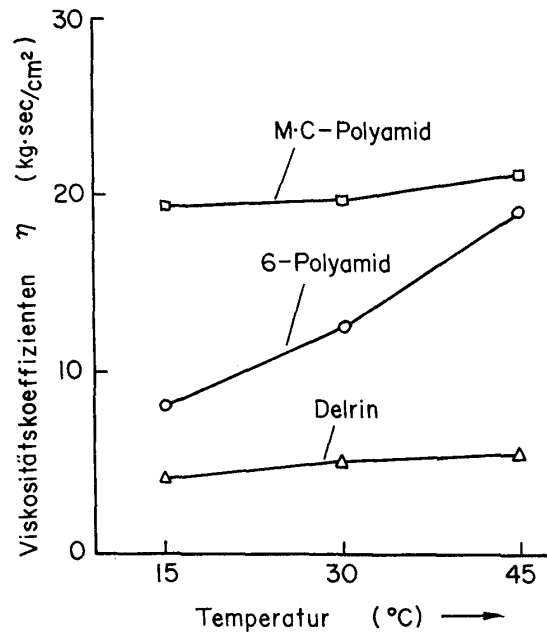


Bild 7. Messergebnisse für den Viskositätskoeffizienten

Versuchsmaterialien. Bei 6-Polyamid ist die Änderung des Viskositätsbeiwert mit der Temperatur ziemlich groß.

IV. Berechnung der erzeugten Wärmemenge

Bild 8 zeigt die Berechnung der bei jedem Zahneingriff erzeugten Wärmemenge H_F und H_C für ein Kunststoffzahnrad mit Modul 6, 26 Zähnen und einem Eingriffswinkel von 20° im Eingriff mit einem Stahlzahnrad mit 21 Zähnen beim Betrieb mit einer Übertragungsleistung von 1.55 PS. In dieser Bild sind die oberen drei Figuren für eine Zahnflankenbelastung von $P_n=25$ kg und eine Drehzahl von 570 U/min, und unteren drei Figuren sind für eine Zahnflankenbelastung von $P_n=12.5$ kg und eine Drehzahl von 1140 U/min. Beim Eingriff eines 6-Polyamidzahnrad, eines MC-Polyamidzahnrad und eines Delrinzahnrad mit einem Stahlzahnrad sind Beispiele für eine Zahnflankentemperatur von 15°C an beiden Zahnradern, eine Zahnflankentemperatur von 30°C für das Kunststoffzahnrad und 35°C für das Stahlzahnrad und für eine Zahnflankentemperatur von 45°C des Kunststoffzahnrad und 55°C des Stahlzahnrad gezeigt. Wenn ein Unterschied zwischen den Zahnflankentemperatur von Kunststoff- und Stahlzahnrad besteht, so wird das auf das Kunststoffzahnrad entfallende Verteilungsverhältnis der Reibungswärmemenge

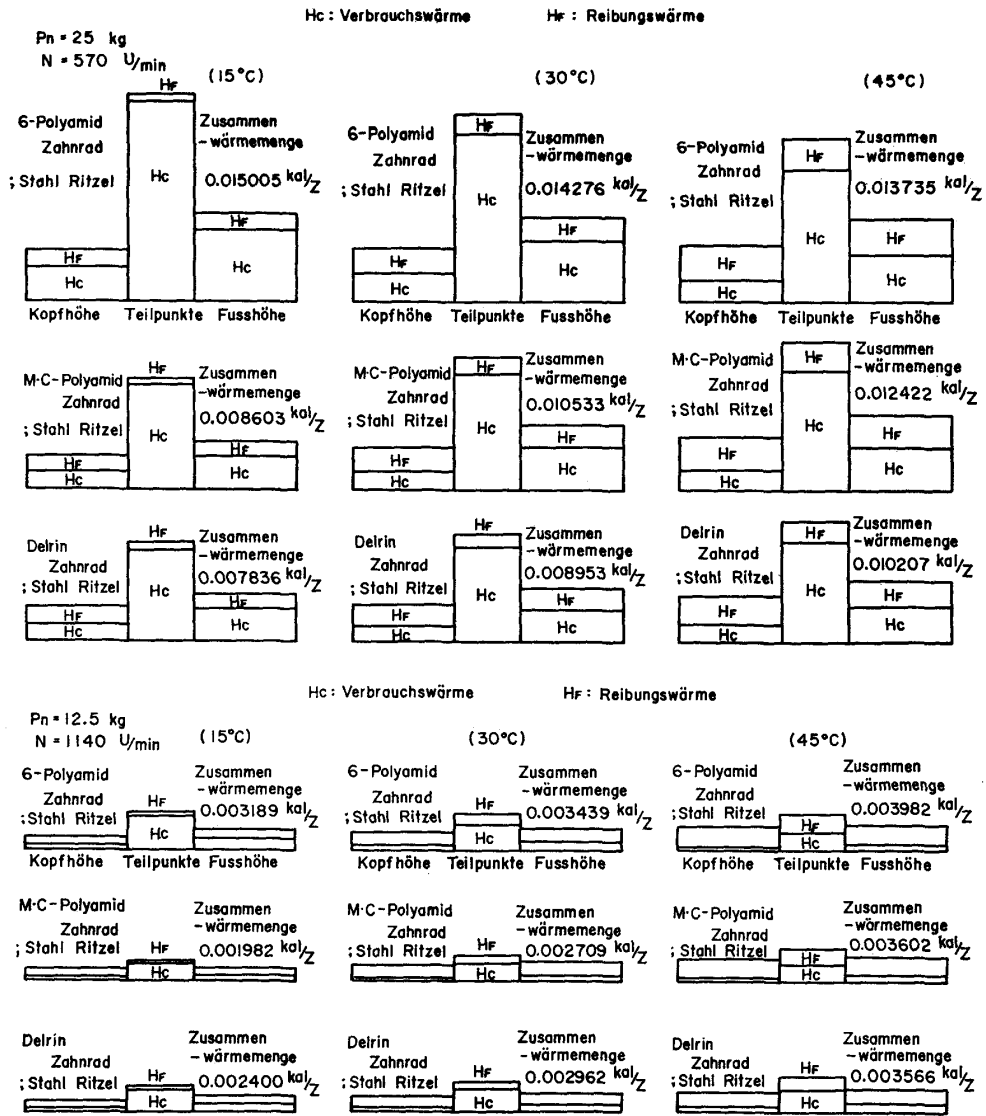


Bild 8. Berechnungsergebnisse für die erzeugte Wärmemenge

groß, und die Reibungswärmemenge H_F steigt an. Bei gleicher Übertragungsleistung verringert sich bei steigender Drehzahl die bei einem Zahneingriff erzeugte Wärmemenge sehr stark.

V. Berechnung der Gleichgewichtstemperatur

Um die Gleichgewichtstemperatur eines Zahns eines Kunststoffzahnrad zu ermitteln, muß die an den Zahnflanken abgegebene Wärmemenge bekannt sein. Diese abgegebene Wärmemenge H_E (cal) wird aus der folgenden Formel erhalten.

$$H_E = \alpha_\omega \cdot A (T_p - T_r) \frac{60}{n} \quad (13)$$

Hier ist α_ω die Wärmeübergangszahl vom sich drehenden Zahnrad erhöhter Temperatur zur Luft (cal/cm² · sec. °C), A ist die Oberfläche eines Zahns (cm²), $(T_p - T_r)$ ist

der Temperaturunterschied ($^{\circ}\text{C}$) zwischen der Zahntemperatur des Kunststoffzahnrad und der Zimmertemperatur, und $60/n$ ist die Zeit (sec) für eine Umdrehung des Zahnrades, wobei n die Drehzahl pro Minute ist. Der Wert der Wärmeübergangszahl von der Zahnradoberfläche, α_w , wird experimentell erhalten. Hierfür wird in einem Windkanal eine Zahnstange aus Kupferplatten fixiert, eine festgelegte Temperatur wird eingehalten, an der Oberfläche dieser Zahnstange wird Silikongummi mit einem bekannten Wärmeübergangszahl angebracht, und die Temperatur an oberer und unterer Seite an verschiedenen Stellen des Silikongummis wird bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten gemessen, um das Wärmeübergangszahl an verschiedenen Stellen von der Zahnstange zu erhalten. Aus dem Durchschnitt dieser Werte wird das durchschnittliche Wärmeübergangszahl eines

Tabelle I. Berechnungsergebnisse für die Gleichgewichtstemperatur

$P_n = 25 \text{ kg} \quad 570 \text{ U/min} \quad 1.55 \text{ p}\cdot\text{s}$

6-Polyamid Zahnrad (15°C) ; Stahl Ritzel (15°C) 20.65 $^{\circ}\text{C}$	6-Polyamid Zahnrad (30°C) ; Stahl Ritzel (35°C) 19.65 $^{\circ}\text{C}$	6-Polyamid Zahnrad (45°C) ; Stahl Ritzel (55°C) 18.90 $^{\circ}\text{C}$
M-C-Polyamid Zahnrad (15°C) ; Stahl Ritzel (15°C) 11.84 $^{\circ}\text{C}$	M-C-Polyamid Zahnrad (30°C) ; Stahl Ritzel (35°C) 14.49 $^{\circ}\text{C}$	M-C-Polyamid Zahnrad (45°C) ; Stahl Ritzel (55°C) 17.10 $^{\circ}\text{C}$
Delrin Zahnrad (15°C) ; Stahl Ritzel (15°C) 10.78 $^{\circ}\text{C}$	Delrin Zahnrad (30°C) ; Stahl Ritzel (35°C) 12.32 $^{\circ}\text{C}$	Delrin Zahnrad (45°C) ; Stahl Ritzel (55°C) 14.04 $^{\circ}\text{C}$

$P_n = 12.5 \text{ kg} \quad 1140 \text{ U/min} \quad 1.55 \text{ p}\cdot\text{s}$

6-Polyamid Zahnrad (15°C) ; Stahl Ritzel (15°C) 6.43 $^{\circ}\text{C}$	6-Polyamid Zahnrad (30°C) ; Stahl Ritzel (35°C) 6.93 $^{\circ}\text{C}$	6-Polyamid Zahnrad (45°C) ; Stahl Ritzel (55°C) 8.02 $^{\circ}\text{C}$
M-C-Polyamid Zahnrad (15°C) ; Stahl Ritzel (15°C) 4.00 $^{\circ}\text{C}$	M-C-Polyamid Zahnrad (30°C) ; Stahl Ritzel (35°C) 5.45 $^{\circ}\text{C}$	M-C-Polyamid Zahnrad (45°C) ; Stahl Ritzel (55°C) 7.26 $^{\circ}\text{C}$
Delrin Zahnrad (15°C) ; Stahl Ritzel (15°C) 4.84 $^{\circ}\text{C}$	Delrin Zahnrad (30°C) ; Stahl Ritzel (35°C) 5.69 $^{\circ}\text{C}$	Delrin Zahnrad (45°C) ; Stahl Ritzel (55°C) 7.18 $^{\circ}\text{C}$

Zahns erhalten. Das Resultat für α_ω wird durch die folgende Formel ausgedrückt.

$$\alpha_\omega = 1.75 \frac{\lambda}{m} \left(\frac{m}{F} \right)^{1.5} \left(\frac{mv}{\nu} \right)^{0.45} \left(\frac{\nu}{a} \right)^{0.4} \quad (14)$$

In dieser Formel ist λ die Wärmeleitzahl der Luft (cal/cm. sec. °C), a ist die Temperaturleitzahl der Luft (cm²/sec), ν ist der dynamische Viskositätsbeiwert der Luft (cm²/sec), m ist der Modul (cm), v ist die Windgeschwindigkeit (cm/sec), und F ist die Zahnbreite (cm). Durch Gleichsetzung der erzeugten Wärmemenge ($H_F + H_C$) mit der abegegebenen Wärmemenge H_E wird die Gleichgewichtstemperatur T_p eines Zahns eines Kunststoffzahnrad durch die folgende Formel erhalten.

$$H_F + H_C = H_E = \alpha_\omega \cdot A (T_p - T_r) \frac{60}{n} \quad (15)$$

$$T_p = T_r + \frac{n(H_F + H_C)}{60 \cdot \alpha_\omega \cdot A} \quad (16)$$

Tabelle I gibt die auf diese Weise berechneten Temperaturanstiege von der Zimmertemperatur an.

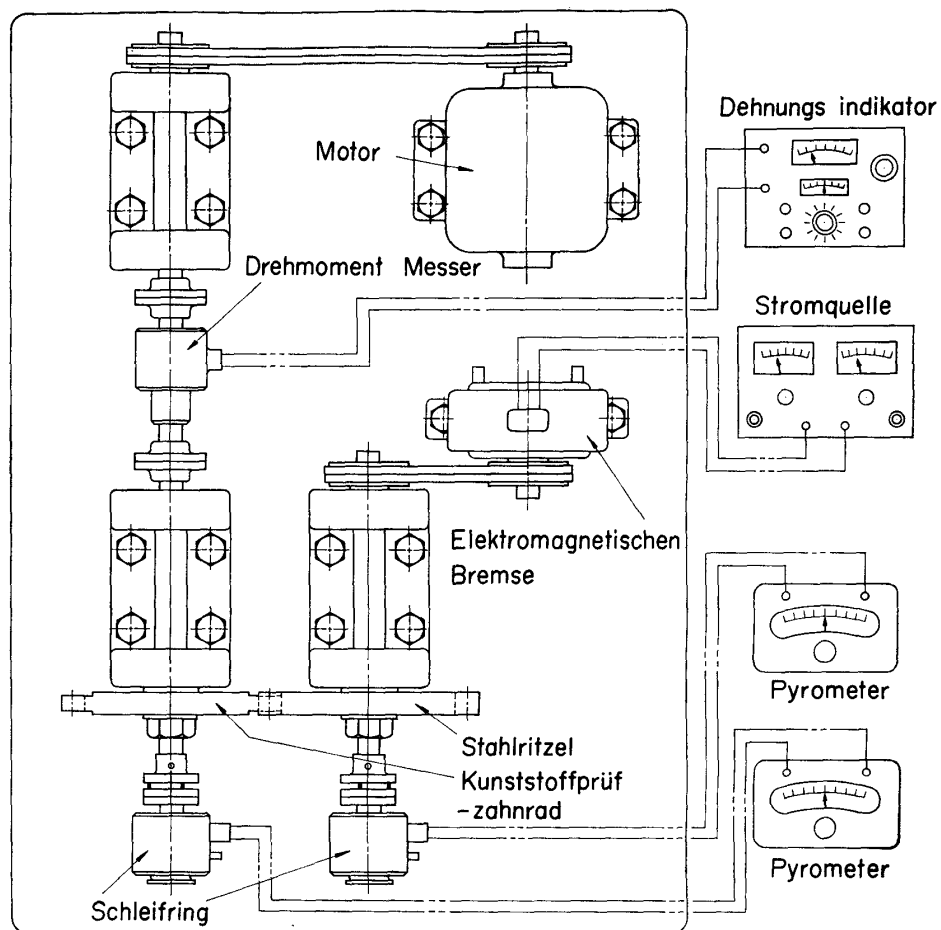


Bild 9. Zahnradprüfmaschine vom Kraftabsorptionsprinzip

VI. Experimentelle Messung der Gleichgewichtstemperatur

Bild 9 zeigt die für diese Versuche verwendete Zahnradprüfmaschine vom Kraftabsorbtionstyp. Mit dieser Prüfmaschine wurden Kunststoffzahnräder und Stahlzahnräder mit den in der obigen Berechnung verwendeten Daten in Eingriff gebracht und unter den festgelegten Bedingungen betrieben, und der Temperaturanstieg der Zähne beider Zahnräder wurde gemessen. Für die Messung des Temperaturstiegs wurde Farbe zur Temperaturmessung auf die Seitenflächen der Versuchszahnäder aufgetragen, um die Temperatur an Hand der Farbänderung zu messen, und gleichzeitig wurden Thermoelemente in die Zähne beider Versuchs-

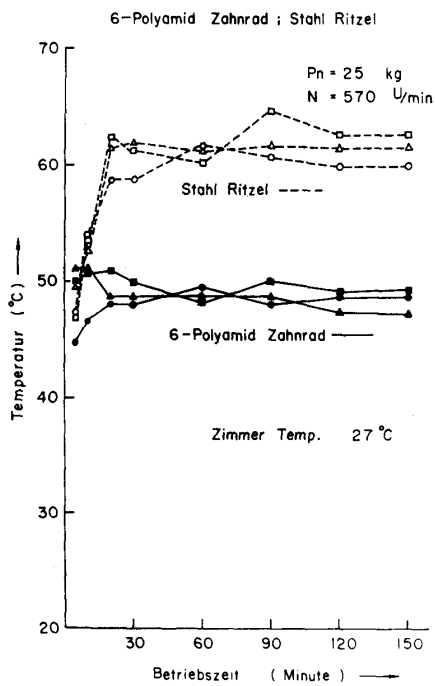


Bild 10.

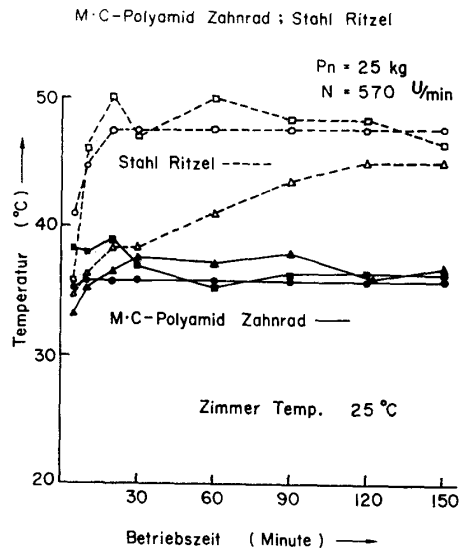


Bild 11.

Bild 10. Meßergebnisse für die Gleichgewichtstemperatur

Bild 11. Meßergebnisse für die Gleichgewichtstemperatur

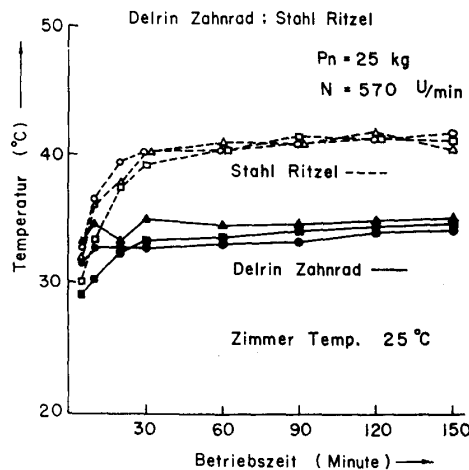


Bild 12. Meßergebnisse für die Gleichgewichtstemperatur

ahnräder eingebettet, und der erzeugte Strom wurde über Schleifringe abgegriffen. Die Farbfotos, die die Farbänderung zeigen, sind aus Platzgründen nicht gezeigt. Bild 10 bis Bild 12 zeigen die Meßergebnisse für den Temperaturanstieg der Zähne

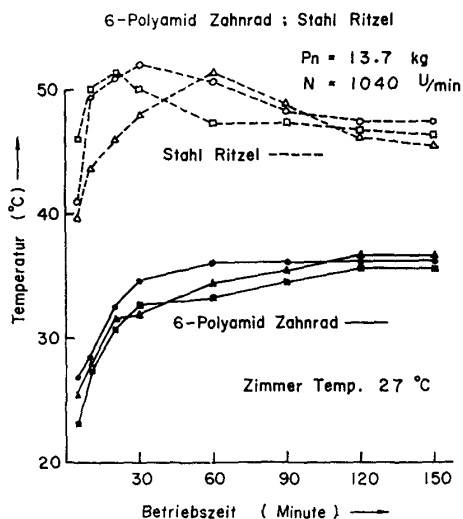


Bild 13.

Bild 13. Meßergebnisse für die Gleichgewichtstemperatur

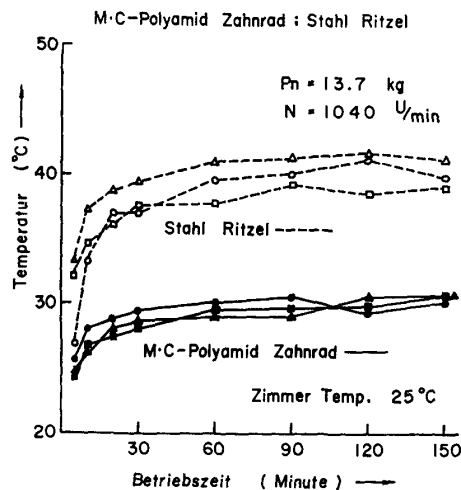


Bild 14.

Bild 14. Meßergebnisse für die Gleichgewichtstemperatur

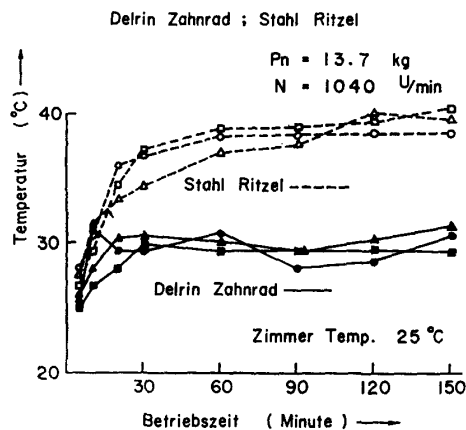


Bild 15. Meßergebnisse für die Gleichgewichtstemperatur

beider Zahnräder durch Thermolemente für eine Zahnflankenbelastung von $P_n = 25$ kg und eine Drehzahl von 570 U/min. Bild 13 bis Bild 15 zeigen die Meßergebnisse für den Temperaturanstieg bei einer Zahnflankenbelastung von $P_n = 13.7$ kg und eine Drehzahl von 1040 U/min. Beim obigen Berechnungsbeispiele war die Zahnflankenbelastung $P_n = 12.5$ kg und die Drehzahl war 1140 U/min, aber da bei der Prüfmaschine die Drehzahl auf 1040 U/min begrenzt war, wurde die Zahnflankenbelastung auf 13.7 kg erhöht, um die Übertragungsleistung von 1.55 PS einzuhalten. Beim Vergleich dieser Versuchsergebnisse mit den obigen Berechnungsergebnissen zeigt sich eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung.

VII. Zusammenfassung

Die obigen Ausführungen können wie folgt zusammengefaßt werden.

1) Es wird eine Berechnungsformel für die beim Eingriff eines Kunststoffzahnrades mit einem Stahlzahnrad erzeugte Wärmemenge, eine Berechnungsformel für die vom sich drehenden Zahnrad erhöhte Temperatur abgegebene Wärmemenge, und eine Berechnungsformel für die Zahngleichgewichtstemperatur eingeführt.

2) Die durch die obige Berechnungsformel erhaltenen Gleichgewichtstemperatur stimmt verhältnismäßig gut mit den Meßergebnissen überein.

3) Bei Erreichen des Gleichgewichtszustandes ist der Temperaturunterschied zwischen den Zähnen des Stahlzahnrades und des Kunststoffzahnrades allgemein etwa 10°C.

Abschließend möchten die Autoren Herrn Shigeru Yamashita, Dozent des Forschungsinstitut für Wissenschaftliche Messung der Tohoku Universität, und Herrn Ken-ichi Nitta, technischer Beamter dieses Instituts, ihren tiefen Dank für die umfassende Unterstützung bei der Durchführung dieser Forschung aussprechen.