

**Zahnräder aus DN-Kunststoffen
1965**



Dynamit Nobel Kunststoffe

Technische Information

**Zahnräder
aus DN-Kunststoffen**

Dynamit Nobel Aktiengesellschaft

Abteilung Kunststoff-Verkauf Troisdorf Bezirk Köln

a) Einführung

Im Fertigungsprogramm der DN sind verschiedene Kunststoffe enthalten, die vornehmlich für Zahnräder angeboten bzw. eingesetzt werden.

Nachstehend werden sie aufgeführt.

Allgemein:

Azetalharz	= DYNAL	}	Thermoplaste*
Polyamid	= TROGAMID B, BMo		
Hartgewebe	= DYTRON G, F	}	Duroplaste*
Kunstharz-Preßholz	= LIGNOFOL Z, EZ		
Vulkanfiber-Schichtpreßstoff	= DYNOPAS		

In Einzelfällen auch:

Polyamid	= TROGAMID R, RMo	}	Thermoplaste*
Polyäthylen	= TROLEN DUR		
PVC	= TROVIDUR	}	Duroplaste*
Hartgewebe	= DYTRON FF		
Vulkanfiber	= DYNOS		
Preßmassen			

Es ist nicht immer leicht, den geeigneten Kunststoff für den richtigen Zweck auszuwählen, zumal dann, wenn man nicht mit allen speziellen Eigenschaften dieser Stoffe vertraut ist.

Wie aus der obigen Aufstellung hervorgeht, sind in unserer Palette alle wichtigen Zahnradwerkstoffe, soweit sie nicht zu den Metallen gehören, enthalten. Diese Materialien sind teilweise genormt. Wenn also ein Zahnrad überhaupt aus Kunststoff gefertigt werden kann, so ist auf jeden Fall auch ein geeignetes Material unter den DN-Kunststoffen zu finden.

Durch die Normung ist es außerdem in vielen Fällen möglich, Konkurrenzprodukte ohne weiteres durch entsprechende DN-Produkte zu ersetzen.

Diese Blätter sollen dazu dienen, die Auswahl eines passenden Kunststoffes zu erleichtern, indem Vergleiche zwischen den einzelnen Produkten unter Berücksichtigung der wichtigsten Faktoren angestellt werden.

Die Stoffe, die nur in Einzelfällen als Zahnräder Verwendung finden, sind nicht als Zahnradmaterial zu bezeichnen. Verschiedene Gründe sprechen dagegen:

1. Die zu geringen Festigkeiten bei TROLEN 200, TROLEN P, TROLEN DUR.
2. Die zu große Kerbempfindlichkeit und Sprödigkeit bei TROVIDUR und den Preßmassen (allerdings nicht solche Massen, die durch Gewebe- bzw. Papierschnitzel verstärkt sind).
3. Die Begrenzung in der Materialdicke bei Vf.
4. Der unverhältnismäßig hohe Preis bei Hartgewebe FF — letzteres gilt sinngemäß auch für TROGAMID R.

Deshalb sollen hier nur die wichtigeren Materialien verglichen werden.

b) Vergleich der Kunststoffe

Die maßgeblichen Gesichtspunkte sind:

1. Preis
2. Festigkeit
3. Wärmebeständigkeit
4. Abriebfestigkeit, Verschleiß
5. Gewicht
6. Öl- bzw. Feuchtigkeitsaufnahme (Maßhaltigkeit)
7. Bearbeitbarkeit

* Anmerkung: **Thermoplaste** können nach ihrer Erstarrung durch Wärmeeinwirkung wieder erweicht und beliebig neu verformt werden. Ausnahme: Trolen DUR.

Duroplaste härten beim Herstellungsprozeß völlig aus, eine Rückführung in den Ausgangszustand ist nicht möglich.

- 8. Geräusentwicklung
- 9. Chemikalienbeständigkeit
- 10. Liefermöglichkeiten

1. Preis

Allgemein liegt der Preis der Kunststoffe über dem der Metalle, die sie ersetzen können und sollen. So kostet ein Stahl der Qualität St. 70 ca. 0,70 DM/kg, ein einfach legierter Stahl ca. 2,10 DM/kg, ein besserer Grauguß ca. 1,20 DM/kg.

Vom Preis her betrachtet ergibt sich für Kunststoffe folgende Rangordnung, wenn für DYNAL ein Preis von 27,50 DM/kg = 100 % zugrunde gelegt wird.

	<u>in %</u>
DYNAL	100
TROGAMID BMo	100
TROGAMID B	91
DYTRON F	34
DYNOPAS	31
DYTRON G	30
LIGNOFOL EZ	16
LIGNOFOL Z	12

Trotz der unterschiedlichen spez. Gewichte gilt diese Reihe in etwa auch für eine volumenmäßige Berechnung bei den Kunststoffen. Gegenüber den Metallen verschiebt sich das Bild aber durch deren etwa sechsmal so großes Gewicht zugunsten obiger Kunststoffe.

2. Festigkeit

Wird die unten angeführte Formel zur Zahnradberechnung betrachtet und vorausgesetzt, daß aus jedem Kunststoff ein völlig gleiches Rad gefertigt wird, das unter absolut gleichen Bedingungen wie alle anderen Räder läuft, so ergibt sich, daß alle Werte der Formel bis auf den Materialfaktor - c - konstant sind.

$$N = \frac{c \cdot b \cdot m \cdot \pi \cdot y \cdot v}{75} \text{ ist dann } N = c \cdot \text{Konstante}$$

c ist also ein Wert, der über die Festigkeit des Materials als Zahnradwerkstoff Auskunft gibt.

(Anhaltswerte)

v (m/sec)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DYNAL	50	40	33,5	29,5	26,5	24,2	22,5	21	19,6	18,5	18	17,5
DYTRON F	38,8	29,5	26,5	24	22,5	21	20	19,3	18,6	18	17,8	17,5
DYNOPAS	29	23	20	18	17	16	15	14,5	14	13,5	13	12,5
LIGNOFOL EZ	} 24	} 22	} 20	} 18	} 17,5	} 16,5	} 15,5	} 14,5	} 14	} 13	} 12,5	} 12
LIGNOFOL Z												
DYTRON G	20	18,5	17	15,3	14,5	13,5	12,7	12,3	12	11,5	11	10,5
TROGAMID B	18	14	12	11	10	9	8,5	8,2	8,0	7,8	7,5	7,3

DYNAL ist also von der übertragbaren Leistung her betrachtet am besten für Zahnräder geeignet, während sich mit TROGAMID die geringsten Leistungen übertragen lassen.

3. Wärmebeständigkeit

Bei guter Schmierung und Kühlung beträgt die Öltemperatur in einem Getriebe ca. 60°C. Bei dieser Temperatur sind noch alle unsere Zahnradwerkstoffe ohne weiteres einsetzbar und die festigkeitsmäßige Rangordnung ist noch gültig. Nicht immer sind jedoch so günstige Verhältnisse gegeben. Es kann vorkommen, daß Öltemperaturen bis 110°C vorhanden sind. Das bedeutet, daß einige Zahnradwerkstoffe nicht mehr eingesetzt werden können, da ja die effektiven Temperaturen innerhalb des Zahnrades wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe noch höher liegen.

Es ergibt sich folgende Reihe:

DYTRON F	— bis ca. 120° C
DYTRON G	— bis ca. 120° C
LIGNOFOL Z, EZ	— bis ca. 110° C
DYNOPAS	— bis ca. 110° C
DYNAL	— bis ca. 85° C
TROGAMID	— bis ca. 80° C

Bei allen Stoffen ist jedoch, wenn sie an der oberen Grenze ihrer Temperaturbeständigkeit eingesetzt werden, ein entsprechender Sicherheitsfaktor vorzusehen, weil die mechanischen Werte bei hohen Temperaturen merklich nachlassen.

4. Abriebfestigkeit, Verschleiß

Bekanntlich haben die Kunststoffe eine sehr hohe Verschleißfestigkeit und übertreffen teilweise sogar Stahl. Bei den an der TH - München durchgeführten Zahnradlaufversuchen wurde regelmäßig die Zahndicke gemessen. Es zeigte sich, daß in fast allen Fällen die Quellung des Materials infolge der Erwärmung und Ölaufnahme höher lag als der Verschleiß (diese Quellung betrug nur wenige μ). Ein deutlicher Verschleiß trat immer erst kurz vor dem Bruch auf. Auf Grund der gewonnenen Erfahrung lassen sich die Werkstoffe in bezug auf Abriebfestigkeit etwa so einstufen:

1. TROGAMID
2. DYNAL
3. DYTRON F
4. DYNOPAS
5. DYTRON G
6. LIGNOFOL

Daraus ergibt sich, daß TROGAMID die besten Notlaufeigenschaften hat, d. h. bei Ausfall der Schmierung die längste Zeit weiterlaufen wird (vorausgesetzt, die Drehzahl ist nicht so hoch, daß die Temperatur unzulässig steigt).

5. Gewicht

Das geringe spez. Gewicht der Kunststoffe ist einer ihrer großen Vorteile. Während Stahl 7,85, Grauguß 7,25 und Aluminium 2,7 g/cm³ wiegen, liegt die Rohdichte aller unserer Kunststoffe unter 1,5 g/cm³.

Obwohl die Unterschiede nicht so groß sind, werden nachstehend unsere Kunststoffe zum Vergleich aufgeführt.

1. POLYAMID	= 1,14 g/cm ³
2. DYTRON F und G	= 1,35 g/cm ³
3. LIGNOFOL Z, EZ	= 1,40 g/cm ³
4. DYNOPAS	= 1,42 g/cm ³
5. DYNAL	= 1,425 g/cm ³

Polyamid ist eindeutig der leichteste der vorerwähnten Kunststoffe, während die anderen praktisch alle mit 1,4 g/cm³ eingestuft werden könnten, da Materialschwankungen zu berücksichtigen sind.

6. Öl- bzw. Feuchtigkeitsaufnahme, Temperaturschwankungen (Maßhaltigkeit)

a) Wasseraufnahme:

Nach 4 Tagen, gemessen am Normstab.

Es handelt sich hierbei um Mittelwerte aus einer großen Zahl von Untersuchungen.

Stoff	%
1. DYNAL	0,41
2. LIGNOFOL EZ	1
3. DYTRON G, F	2,4
4. TROGAMID B	2,3
5. DYNOPAS	5
6. LIGNOFOL Z	8

Für die Ölaufnahme stehen vergleichbare Werte noch nicht zur Verfügung. Die Abstufungen werden aber in etwa denen der Wasseraufnahme entsprechen. Die absoluten Werte liegen niedriger.

b) Temperaturänderungen beeinflussen die Maßhaltigkeit ebenfalls ganz erheblich bei den Kunststoffen. Als Vergleichswert dient die lineare Wärmedehnzahl α .

Bei einer Temperaturdifferenz $t_2 - t_1$ beträgt die Längenänderung $l_2 - l_1 = l_1 \cdot \alpha (t_2 - t_1)$,

z. B. bei DYNAL: $t_1 = 20^\circ\text{C}$ $t_2 = 80^\circ\text{C}$, Stab $l_1 = 50$ mm lang, $\alpha = 80 \cdot 10^{-6}$;

$$l_2 - l_1 = 50 \cdot 80 \cdot 10^{-6} \cdot (80 - 20)$$

$$= 240\,000 \cdot 10^{-6}$$

$$l_2 - l_1 = 0,24 \text{ mm}$$

$$l_2 = 50,24 \text{ mm}$$

d. h. ein DYNAL-Stab von 50 mm Länge hat sich infolge Temperaturerhöhung von 20 auf 80°C um 0,24 mm ausgedehnt!

Vergleich: Stoff	Ausdehnungszahl α [$1/^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$]
1. DYTRON F, G	10—25
2. DYNOPAS	25
3. LIGNOFOL Z, EZ	30
4. DYNAL	80
5. TROGAMID	110

TROGAMID zeigt also die größte Wärmedehnung (Stahl hat eine lineare Wärmedehnzahl von nur $11 \cdot 10^{-6}$).

7. Bearbeitbarkeit

Spangebende Verarbeitung: Alle unsere Zahnradwerkstoffe können spangebend verarbeitet werden. Bei den Duroplasten, die infolge des Harzanteiles spröder sind, ist die Verwendung von Hartmetallwerkzeugen erforderlich, wenn rationell gearbeitet werden soll, während bei den Thermoplasten Schnellstahl ausreicht. Bei Schichtstoffen ist ein Abblättern von Schichten beim Verarbeiten möglich (Gegenplatte erforderlich). Bohrungen und Gewinde parallel zur Schichtrichtung sind hierbei nicht ratsam.

Spanlose Verarbeitung: Hier liegt der große Vorteil der Thermoplaste. Spritzen usw. kommt nur bei größeren Serien in Frage. Wegen dieses Vorteils geht man in solchen Fällen auf Thermoplaste über.

Es besteht die Möglichkeit, bei größeren Serien auch Hartgewebe-Zahnräder zu pressen.

Grob gesehen ergibt sich die folgende Reihenfolge:

1. DYNAL
2. TROGAMID
3. DYTRON
4. DYNOPAS
5. LIGNOFOL Z
6. LIGNOFOL EZ

8. Geräusentwicklung

Die Geräusentwicklung bzw. Geräuschdämpfung hängt weitgehend von der Härte des Materials ab. (Wenn vom Einfluß der Verzahnungsqualität u. d. Verzahnungsart einmal abgesehen wird). Als Vergleichswert ist hier der Elastizitätsmodul anzuführen. Niedriger E-Modul = weiches Material, hoher E-Modul = hartes Material.

1. TROGAMID	11—20 000 kp/cm ²
2. DYNAL	32 000 kp/cm ²
3. DYNOPAS	80 000 kp/cm ²
4. DYTRON F, G	90 000 kp/cm ²
5. LIGNOFOL Z, EZ	140 000 kp/cm ²
(Stahl)	2 100 000 kp/cm ²

Zahnräder aus TROGAMID erzeugen also das geringste Geräusch.

9. Chemikalienbeständigkeit

DYNAL ist dem TROGAMID etwas überlegen. Beide sind jedoch mit Abstand besser als die anderen Stoffe. Die Schichtstoffe können in etwa gleichgesetzt werden.

- DYNAL
- TROGAMID
- DYNOPAS
- DYTRON
- LIGNOFOL

10. Liefermöglichkeiten

Wird von der Möglichkeit des Spritzens abgesehen und hier nur verglichen in welcher Form das Material zur Herstellung von Zahnrädern bei uns bezogen werden kann, so ergibt sich:

TROGAMID und DYNAL können als Rundstäbe geliefert werden, aus denen rationell Zahnräder herstellbar sind (Rundstäbe aus Schichtstoffen sind für Zahnräder **nicht** geeignet).

DYNOPAS ist, außer in Platten, lieferbar als Ronde in vielen Abmessungen — was für eine Einzelfertigung sehr vorteilhaft ist;

Hartgewebe und LIGNOFOL müssen als Platte bezogen werden, also:

DYNOPAS
TROGAMID
DYNAL
DYTRON
LIGNOFOL

In vielen Fällen wird es möglich sein, anhand der vorstehenden Ausführungen den für einen bestimmten Einsatz geeigneten Kunststoff auszuwählen.

Wenn jedoch spezielle Anforderungen gestellt werden, ist unsere Anwendungstechnische Abteilung gern bereit, eine unverbindliche Beratung durchzuführen.

Eine wichtige Bedingung hierfür ist allerdings, daß nach dem Schema des angehefteten Formulars unseren Ingenieuren umfassende Auskunft über den Einsatz des Teiles gegeben wird.

c) Zusammenfassung

Preis	Festigkeit	Wärmebeständigkeit	Abriebfestigkeit	Gewicht	Bearbeitung	Maßhaltigkeit *)		Geräusch	Chemikalien	Liefermöglichkeiten
						a)	b)			
1. Z	DI	F	B	B	DI	DI	F, G	B	DI	Ds
2. EZ	F	G	DI	F, G	B	EZ		Ds	B	B, DI
3. G	Ds	Z, Ez	F		F, G	G, F	Ds	Ds	Ds	
4. Ds	EZ		Ds	Z, EZ			Z, EZ	F, G	F, G	F, G
5. F	Z	Ds	G		Ds	B				
6. B	G	DI	Z, EZ	Ds	Z	Ds	DI	Z, EZ	Z, EZ	Z, EZ
7. DI	B	B		DI	EZ	Z	B			

Erklärung: 1. ist das Günstigste, 7. das Ungünstigste

Die Zeichen heißen:

- DI = Dynal
- B = Trogamid B
- F = Dytron F
- G = Dytron G
- Ds = Dynopas
- Z = Lignofol Z
- EZ = Lignofol EZ

*) a) Feuchtigkeitseinfluß
b) Wärmeeinfluß

d) Beispiel:

Ein Antrieb für eine bestimmte Maschine soll folgende Bedingungen erfüllen:

- a) niedriges Gewicht
- b) kleine Schwungmassen
- c) möglichst geringes Geräusch
- d) günstiger Preis

Daten:

Serie von 200 Stück	
N	= 12 PS
n	= 1350/min.
d_{o1}	= 100 mm (Ritzel- ϕ)
m	= 5 mm
i	= 4 (Übersetzungsverhältnis)
Öltemperatur	= 90° C, Getriebe voll gekapselt
Stoßfaktor	= 1,1

Auswahl des Werkstoffes:

Zur Reduzierung des Geräusches ist es erforderlich, bei **Stahlzahnradern** Schrägverzahnung mit gehärteten und geschliffenen Flanken vorzusehen. Das bedeutet: Einsatz eines teureren Stahles.

Durch die Verwendung von **Kunststoff** ist es möglich, eine wirksamere Geräuschkämpfung **ohne** das teure Härten und Schleifen zu erreichen. Das gilt allerdings nur für **ein** Rad, da es nicht ratsam ist, beide Räder aus Kunststoff zu fertigen.

Es ist also — wenn das festigkeitsmäßig erlaubt ist — ein Rad aus Kunststoff und ein Rad aus Metall zu wählen.

Zweckmäßigerweise wird das große Rad aus Kunststoff und das kleine Rad (Ritzel) aus Stahl oder Guß angefertigt. Dabei wird die größere Gewichtseinsparung erzielt und die Beanspruchung der Zähne ist geringer.

Welcher Kunststoff kommt infrage?

Die Bedingungen a) und b) werden von allen erfüllt. Dem Punkt c) würden die Thermoplaste am besten entsprechen. Die Öltemperatur von 90° C läßt jedoch den Einsatz dieser Stoffe nicht ratsam erscheinen.

Die Duroplaste verfügen ebenfalls über sehr gute Dämpfungseigenschaften. Ausschlaggebend wird schließlich die Preisfrage sein. LIGNOFOL Z und EZ liegen hier am günstigsten. Da LIGNOFOL EZ die geringere Ölaufnahme hat, ist dieses Material hier zu bevorzugen!

Festigkeitsrechnung

Die übertragbare Leistung ist:

$$N = \frac{c \cdot b \cdot m \cdot \pi \cdot y \cdot v}{75} \quad (\text{PS})$$

Es bedeutet:

- N = Leistung (PS)
- c = Materialfaktor (kg/cm²)
- m = Modul (cm)
- v = Umfangsgeschwindigkeit (m/sec)
- y = Zahnfaktor, zu berechnen nach:

$$y = 2 - \frac{30}{Z+10}$$

Es ergibt sich aus n und d_{o1}
aus m und d_{o1}
aus Z_1 und i
aus d_{o1} und i

$$\begin{aligned}v &= 7 \text{ m/sec} \\Z_1 &= 20 \text{ Zähne} \\Z_2 &= 80 \text{ Zähne} \\d_{o2} &= 400 \text{ mm}\end{aligned}$$

die Zahnbreite muß bei diesem Durchmesser ca.

$$b = 10 \times m = \text{ca. } 50 \text{ mm betragen}$$

mit der genannten Formel ist

$$y = 1,67$$

nach Seite 3 wird c (für v = 7 m/sec) = 15,5 kg/cm².

Fragebogen

der Dynamit Nobel Aktiengesellschaft

für die Beurteilung des Kunststoff-Einsatzes

1. a) Mit welchen Teilen laufen der Gegenstand oder die zu fertigenden Teile zusammen?

.....

b) Aus welchen Materialien sind die zusammenlaufenden Teile gefertigt?

.....

2. Welche Beanspruchungen treten im allgemeinen auf (dauernd oder zeitweise)?

a) Biegung

b) Verdrehung

c) Druck

d) Zug

e) Schub

f) Wie hoch wird die Drehbeanspruchung in kp/cm^2 sein? (Nähere Angaben zu b)

.....

g) Welche Leistungen sind zu übertragen?

h) Drehzahl?

3. Wechsel der Beanspruchungen je Minute und in welcher Größe?

.....

4. Treten starke Erschütterungen (Vibrationen) auf? Nähere Angaben.

.....

.....

5. Sonstige Beanspruchungen

.....

6. Welche maximalen Temperaturen treten an den genannten Teilen auf?

a) bei normalem Dauerbetrieb

b) kurzzeitig? min: max.

c) Sind die Teile der Kälte ausgesetzt?°C

7. Werden Korrosionsfestigkeiten gefordert?

a) Säuren pH-Wert

b) Laugen pH-Wert

c) Salzwasser

d) sonstige Stoffe?

8. Welche Schmiermöglichkeiten stehen zur Verfügung?

- a) Öl
- b) Fett
- c) Anfangsschmierung durch Molybdändisulfid, Fett, Graphit oder Öl
- d) Wasser
- e) andere Flüssigkeiten
- f) ohne

9. Ist eine besondere Kühlung vorhanden?

- a) Flüssigkeit
- b) Luft
- c) Gas
- d) ohne

10. Welchen Feuchtigkeiten ist das Material ausgesetzt (rel. LF)?

- a) min.
- b) max.

11. Welche Lebensdauer wird gefordert? bezüglich:

- a) Ermüdung
- b) Abrieb
- c) Korrosion
- d) allgemein
- bei Dauereinsatz
- bei unterbrochenem Einsatz

12. Sind konstruktive Änderungen der Teile möglich, welche?

.....
.....

13. Welche Abmessungen muß das Rohmaterial haben?

.....

14. Welche besonderen Bedingungen sind noch zu erfüllen?

.....

15. Liegen besondere Materialwünsche vor?

.....

16. Sind Muster vorhanden, die für evtl. Untersuchungen zur Verfügung gestellt werden können?

.....

17. Können Zeichnungen zur Verfügung gestellt werden?

.....

$$\text{Damit wird } N_{\text{zul.}} = \frac{15,5 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot \pi \cdot 1,67 \cdot 7}{75} = \mathbf{19 \text{ PS}}$$

Wenn für die erhöhte Temperatur ein Sicherheitsfaktor $f_T = 1,3$ berücksichtigt wird
und wegen evtl. auftretender Stöße der Stoßfaktor $f_{\text{St}} = 1,1$
ist die übertragbare Leistung

$$N_{\text{zul.}} = \frac{19}{1,1 \cdot 1,3} = \mathbf{13,3 \text{ PS}}$$

Das Lignofolrad ist also in der Lage, die geforderte Leistung zu übertragen!

Vergleich:

Das Stahlrad hätte aus konstruktiven Gründen ebenfalls eine Breite von etwa 10 x m haben müssen. Das Kunststoffrad bringt also eine Gewichtserleichterung um ca. 4/5.

Der Preis des gewählten Kunststoffes liegt zwar etwa doppelt so hoch wie der des infrage kommenden Stahles. Trotzdem sind aber durch das geringere Gewicht die reinen Werkstoffkosten mehr als die Hälfte niedriger. Die billigere Verarbeitung des Kunststoffes bringt eine weitere Vergünstigung.