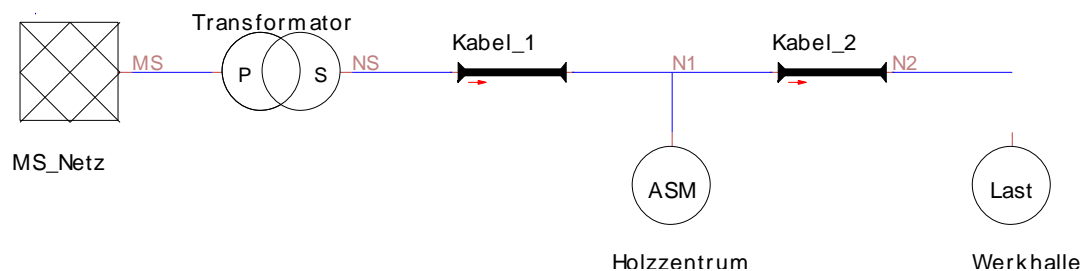


**Aufgabe:**

In einem Industriegebiet soll ein Holzverarbeitungszentrum errichtet werden. Um den Aufwand gering zu halten, soll die elektrische Energieversorgung über eine 275m lange Stickleitung, die zur Versorgung einer Werkhalle (60kVA) dient, realisiert werden. Geplant ist, das von der Transformatorenstation verlegte Erdkabel NAYY 4x150 mm<sup>2</sup> nach 175m zu schneiden und eine T-Muffe einzusetzen. Dieser Punkt stellt den Verknüpfungspunkt (Bewertungspunkt) für das Holz-verarbeitungszentrum dar. Das übergeordnete Mittelspannungsnetz ist ein 20 kV Netz. Das Holzverarbeitungszentrum wird in CERBERUS durch eine Asynchronmaschine und die vorhandene Werkhalle durch eine Last dargestellt.

Ziel dieser Aufgabe soll es sein, die Netzzrückwirkungen durch das Holzverarbeitungszentrum, speziell Flicker, zu bewerten. Bei Überschreitung der zulässigen Grenzwerte müssen gegebenenfalls Maßnahmen zur Minimierung der Flickerstärke getroffen werden.

**Netzplan:**

**Netzdaten:** MS-Netz: 20 kV NS-Netz: 0,4 kV

$$S_k = 100 \text{ MVA}$$

**Transformatordaten:** Öltransformator

$$S_N = 400 \text{ kVA}$$

$$u_k = 4,04 \%$$

**ASM (Holzzentrum):**

Nennscheinleistung = 25kVA

Leistungsfaktor = 0,8

Flicker: Wirkleistung = 12,743 kW

Blindleistung = 9,568 kW

Im fehlerfreien Betrieb wird die Holzverarbeitungsmaschine einmal am Tag eingeschaltet und arbeitete dann 10 Stunden. Während des Betriebs werden die Arbeitsschritte Transport, Einspannen, Positionieren und Sägen kontinuierlich ausgeführt. Dadurch variiert die Stromaufnahme zwischen 15A und 38A ( $\Delta I_A = 23A$ ) mit einer Wiederholrate von etwa 40mal je Minute im Dauerbetrieb. Der Verlauf der Leistungsänderung entspricht einer Rechteck-Form und der Wirkleistungsfaktor des Motors gleicht dem Winkel der Laständerung  $\Delta\phi_A$ .

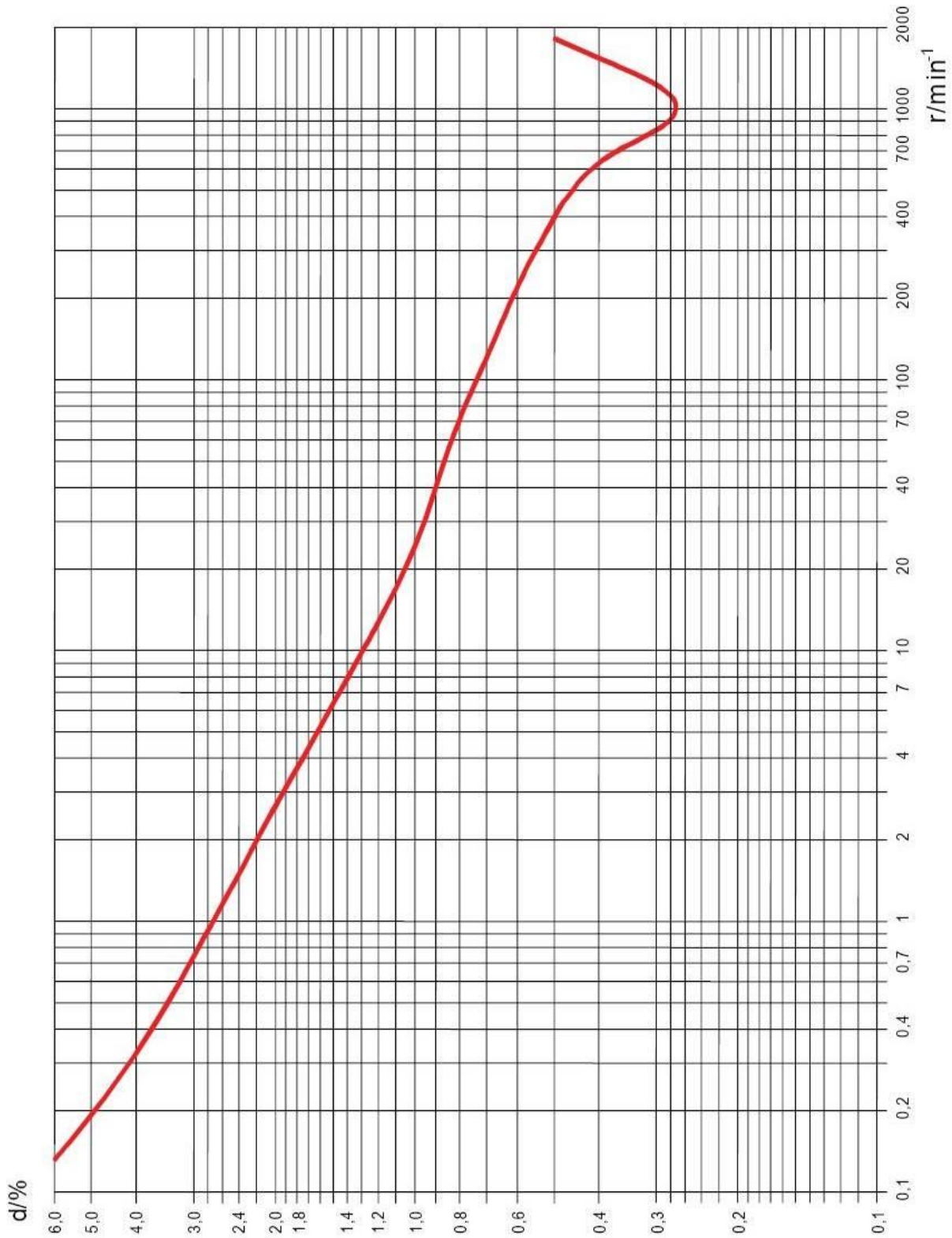
**Last (Werkhalle):** Scheinleistung = 60 kVA

Leistungsfaktor = 0,995

**Kabel1:** NAYY 4x150 mm<sup>2</sup> RM 0,6/1 kV  
 $l = 175 \text{ m}$

**Kabel2:** NAYY 4x150 mm<sup>2</sup> RM 0,6/1 kV  
 $l = 100 \text{ m}$

Nachfolgende Abbildung zeigt die Kurzzeit-Flickerreferenzkurve:



## Lösung:

### Theoretische Berechnung

Hierbei handelt es sich um eine Anlage die elektrische Energie bezieht.

- Berechnung der Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt

#### Netzimpedanz

$$Z_{\dot{U}N} = \frac{U_{\dot{U}N}^2}{S_{k\dot{U}N}} = \frac{(20kV)^2}{100MVA} = 4\Omega \quad (\text{bezogen auf } 20kV)$$

Wenn das übergeordnete Netz ein Mittel- oder Hochspannungsnetz ist, kann der ohmsche Anteil der Impedanz vernachlässigt werden. Das bedeutet  $R_{\dot{U}N} \approx R_{\dot{U}N_V} \approx 0$  und  $Z_{\dot{U}N} \approx X_{\dot{U}N} \approx 4\Omega$ .

$$Z_{\dot{U}N_V} \approx X_{\dot{U}N_V} = Z_{\dot{U}N} \left( \frac{U_V}{U_{\dot{U}N}} \right)^2 = 4\Omega \cdot \left( \frac{0,4kV}{20kV} \right)^2 = 1,6\Omega \quad (\text{bezogen auf } 0,4kV)$$

#### Transformator

$$u_{r_T} = \frac{P_{k_T}}{S_{r_T}} \cdot 100\% = \frac{6kW}{400kVA} \cdot 100\% = 1,5\%$$

$$u_{x_T} = \sqrt{u_{k_T}^2 - u_{r_T}^2} = \sqrt{4,04^2 - 1,5^2} = 3,75\%$$

$$X_T = \frac{u_{x_T}}{100\%} \cdot \frac{U_{r_T}^2}{S_{r_T}} = \frac{3,75\%}{100\%} \cdot \frac{(0,4kV)^2}{400kVA} = 15m\Omega = X_{T_V} \quad (\text{bezogen auf } 0,4kV)$$

$$R_T = \frac{u_{r_T}}{100\%} \cdot \frac{U_{r_T}^2}{S_{r_T}} = \frac{1,5\%}{100\%} \cdot \frac{(0,4kV)^2}{400kVA} = 6m\Omega = R_{T_V} \quad (\text{bezogen auf } 0,4kV)$$

#### Kabel

$$R_L = R'_L \cdot l = 0,20683 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,175km = 36,2m\Omega = R_{L_V}$$

$$X_L = X'_L \cdot l = 0,09111 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,175km = 15,9m\Omega = X_{L_V}$$

#### Impedanz und Impedanzwinkel am Verknüpfungspunkt V

$$R_{k_V} = \sum R_{m_V} = R_{\dot{U}N_V} + R_{T_V} + R_{L_V} = 0 + 6m\Omega + 36,2m\Omega = 42,2m\Omega$$

$$X_{k_V} = \sum X_{m_V} = X_{\dot{U}N_V} + X_{T_V} + X_{L_V} = 1,6m\Omega + 15m\Omega + 15,9m\Omega = 32,5m\Omega$$

$$Z_{k_V} = \sqrt{R_{k_V}^2 + X_{k_V}^2} = \sqrt{(42,2m\Omega)^2 + (32,5m\Omega)^2} = 53,3m\Omega$$

$$\psi_{k_V} = \arctan \frac{X_{k_V}}{R_{k_V}} = \arctan \frac{32,5m\Omega}{42,2m\Omega} = 37,6^\circ$$

### Kurschlussleistung am Verknüpfungspunkt V

$$S_{kV} = \frac{U_V^2}{Z_{kV}} = \frac{(400V)^2}{53,3m\Omega} = 3MVA$$

- Einschaltvorgang

Laut Aufgabenstellung wird die Holzverarbeitungsmaschine im fehlerfreien Betrieb nur einmal eingeschaltet. Damit ist die Wiederholrate der Laständerung  $r < 0,1 \text{ min}^{-1}$  und somit ist eine Flickerbewertung nicht nötig.

- Flicker

Betriebsstromänderung:  $\Delta I_A = 23A$

Wiederholrate:  $r = 40 \text{ min}^{-1}$

Aus der Flickerreferenzkurve ergibt sich für  $r = 40$  eine Referenzamplitude  $d_{ref}$  von:

$$d_{ref} = 0,9\%$$

### Scheinleistungsänderung im Betrieb

$$\Delta S_A = \sqrt{3} \cdot U_r \cdot \Delta I_A = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 23A = 15,935kVA$$

### Spannungsänderung

$$d = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi_{kV} - \Delta\varphi_A) = \frac{15,935kVA}{3000kVA} \cdot \cos(37,6^\circ - 36,9^\circ) = 0,00531 \approx 0,531\%$$

### Kurzzeitflicker nach Formel 3

$$P_{st} = \frac{d}{d_{ref}} \cdot P_{st_{ref}} = \frac{0,531\%}{0,9\%} \cdot 1 = 0,59$$

Die Kurzzeitflickerstärke ist im zulässigen Bereich, da  $0,59 < 0,8$ .

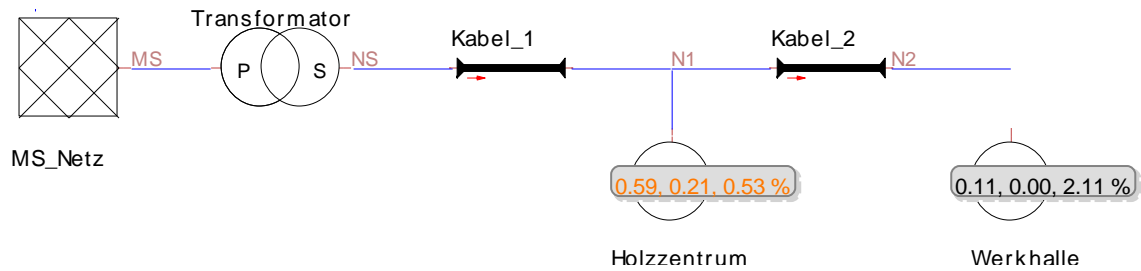
### Langzeitflickerstärke

Durch die kontinuierliche Abfolge der Arbeitsschritte kann die Kurzzeit-Flickerstärke als konstant angenommen werden und entspricht der Langzeit-Flickerstärke.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st_i}^3}{12}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 0,59^3}{12}} = 0,59$$

Die Langzeitflickerstärke ist mit  $0,59 > 0,5$  und muss minimiert werden. Das Holzverarbeitungszentrum kann daher nicht an die vorhandene Sticheitung angeschlossen werden. Um die Langzeitflickerstärke zu reduzieren müssen verschiedene Flickerminimierungsmaßnahmen angewendet werden, welche im Einzelnen mit der Berechnung mit CERBERUS gezeigt werden.

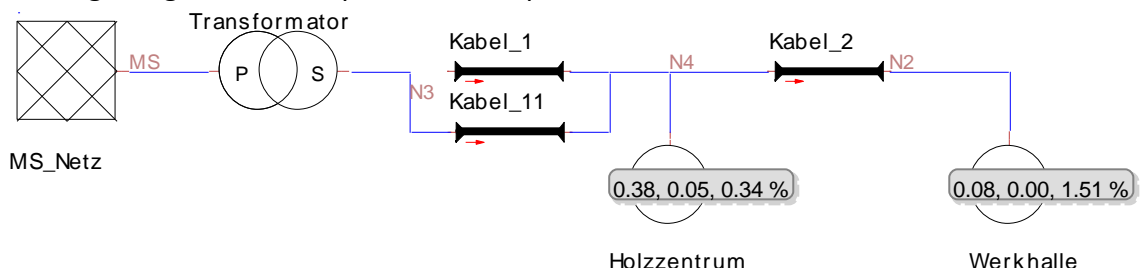
## Berechnung mit Cerberus



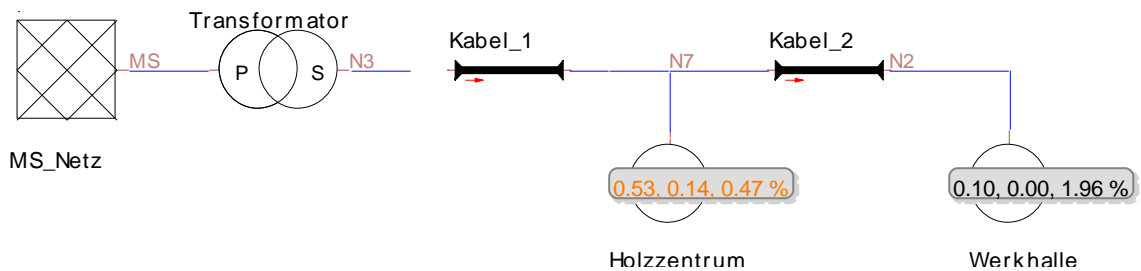
Flickerpegel = 0,59  
 Flickerstörfaktor = 0,21  
 Spannungsänderung = 0,53 %

Bei der Berechnung mit Cerberus muss man die Flicker-Analyse mit 20°C durchführen, um die theoretisch errechneten Werte mit den Werten aus Cerberus vergleichen zu können. Der in Cerberus simulierte Flickerpegel entspricht den Werten aus der theoretischen Berechnung für den Langzeitflickerstärke. Wie man feststellt sind die Werte beide identisch, wobei nun die Lösungsvorschläge, aus Sicht des Energieversorgungsunternehmens, mit Cerberus erfolgen.

### a) Verringerung der Kabelimpedanz durch parallel Kabel



### b) Transformator Wechsel mit höherer Kurzschlussspannung^

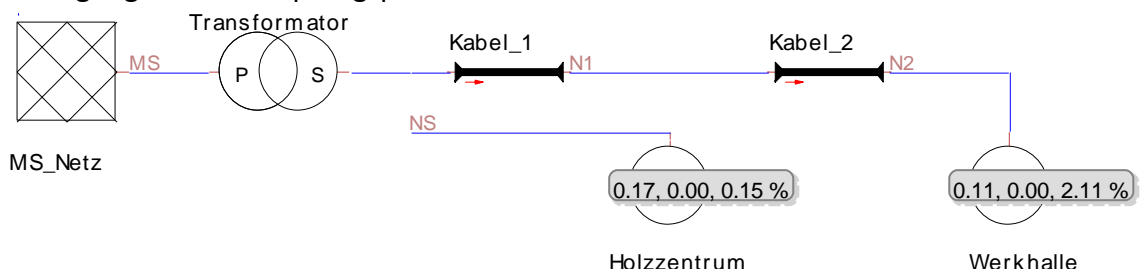


Transformatordaten: Öltransformator

$$S_N = 1000 \text{ kVA}$$

$$u_k = 6,37 \%$$

### c) Verlegung des Verknüpfungspunktes



Wie in den 3 Varianten zu sehen ist, wird ein Transformatorwechsel wenig Sinn machen da er viel zu groß werden muss um die Toleranzen einzuhalten.

Die Variante a) bringt den Erwünschten Erfolg, ist aber mit einem gewissen Aufwand verbunden. Bei der Variante c) wird dem Unternehmen ein Verknüpfungspunkt direkt am Transformator vorgeschrieben und bei dieser Variante wird der Flickerpegel am Verknüpfungspunkt am effektivsten gesenkt.

### Theorie:

Flicker ist der Eindruck der Unstetigkeit visueller Empfindungen, hervorgerufen durch Lichtreize mit zeitlicher Schwankung der Leuchtdichte oder der spektralen Verteilung. Die Schwankung der Leuchtdichte, im täglichen Sprachgebrauch auch Helligkeitsschwankung genannt, wird durch Spannungsänderungen hervorgerufen. Diese wiederum wird durch Laständerung verursacht. Das wiederholte Auftreten von Spannungsänderungen (z.B. Sägegatter) ist als Spannungsschwankung definiert. Die daraus folgende Leuchtdichteänderung von Lampen wird als Flicker bezeichnet und kann als optische Erscheinung wahrgenommen werden. Ab einem Grenzwert müssen die Flicker begrenzt werden, da sie als störend empfunden werden. Als Messgröße wird die Flickerstärke  $P$  verwendet.

Die Erzeuger für die Spannungsschwankungen und die daraus resultierenden Flicker werden unter anderem hervorgerufen durch Ein- und Ausschaltvorgänge größerer Lasten, Motoren größerer Leistung beim Anlauf und bei Laständerung, Lichtbogenöfen, Walzantriebe, Variable Einspeiser (zum Beispiel Windenergieanlagen) oder gesteuerte Lasten (zum Beispiel Schwingungspaketsteuerung). Aber auch Geräte und Einrichtungen im Kleingewerbe oder Haushalt zählen zu den Verursachern. Dazu zählen unter anderem Aufzüge, Kopiergeräte, Staubsauger oder Elektrowerkzeuge.

Zur Quantifizierung von Flicker wird die Flickerstärke verwendet. So kann die Intensität der Flickerstörung angegeben werden. Zur Beschreibung wird eine Kurzzeit-Flickerstärke  $P_{st}$  und eine Langzeit-Flickerstärke  $P_{lt}$  herangezogen. Beide Größen sind dimensionslos und werden am Verknüpfungspunkt ermittelt.

Die Kurzzeitflickerstärke wird über einen Zeitbereich von 10 Minuten ermittelt. Da dies zur Beurteilung von Störwirkungen von einzelnen Verbrauchern mit kurzen Betriebszyklen am besten geeignet ist, ist die Kurzzeit-Flickerstärke für die Produktnormung ausschlaggebend. Die Langzeitflickerstärke wird zur Beurteilung der Störung von Flickererzeugern mit langen und veränderlichen Betriebszyklen herangezogen. Dabei wird die Flickerstärke über einen Zeitbereich von 2 Stunden ermittelt. Somit ist die Langzeit-Flickerstärke ein Indiz für die Spannungsqualität. Die Berechnung der Langzeit-Flickerstärke ergibt sich aus einer Folge von 12 Kurzzeit-Flickerstärke-Werten, die in Abständen von 10 Minuten ermittelt werden.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st_i}^3}{12}}$$

$P_{lt}$  Langzeit-Flickerstärke  
 $P_{st}$  Kurzzeit-Flickerstärke  
 $i$  Laufindex der 10min. Werte

Bei Kundenbeschwerden wegen Leuchtdichteänderung gegenüber dem Energieversorgungsunternehmen wird meist die Langzeit-Flickerstärke zur Beurteilung herangezogen.