

In dieser mehrteiligen Beitragsreihe gingen wir ausführlich auf die gesamte Grundlagenbreite ein, die für eine Elektrofachplanung in Gebäuden Voraussetzung sind. Die bereits im vierten Teil begonnene konkrete Gebäudeplanung anhand des Planungsbeispiels einer Lagerhalle wird hier zu Ende berechnet. Ein sechster Teil wird den Abschluss dieser Beitragsreihe bilden. (Fortsetzung aus »de« 7/2009, S. 28)

Elektroanlagen planen und projektieren (5)

Abschließende Berechnungen zum Projekt Lagerhalle

Viele Berechnungsschritte sind notwendig, um allein die Komponenten der Hauptstromversorgung eines Gebäudes zu ermitteln. Insbesondere wenn es sich nicht um ein reines Standardwohngebäude handelt. Das bereits im vierten Beitragsteil begonnene Projekt Lagerhalle zeigt dies schon deutlich. Wir beschränken uns deshalb hier auf den Planungsansatz der Gebäudeenergieversorgung. Reelle Planungen füllen in der Praxis nicht selten viele Aktenordner.

Als Grundlage der nachstehenden Berechnungen gelten die Werte gemäß Bild 7 (vierter Beitragsteil in »de« 7/2009, S. 30). Die begonnenen Projektschritte 1 bis 7 werden hier nun vervollständigt.

Projektschritt 8

Gesucht werden die Leitungsverluste und die Jahresverlustarbeit bei Vollbetrieb (8760h), gegeben: Arbeitspreis 18ct/kWh. Die berechnete Verlustleistung lautet:

$$P_V = 3 \cdot I^2 \cdot \frac{l}{\kappa \cdot s} = 3 \cdot (21,7A)^2 \cdot \frac{55m}{56 \frac{m}{\Omega mm^2} \cdot 4mm^2} = \underline{\underline{346,9VA}}$$

Die Verlustarbeit berechnet sich wie folgt: $W_V = P_V \cdot t = 346,9W \cdot 8760h = 3038,5kWh$. Daraus ergeben sich Kosten von: $3038,5kWh/a \cdot 0,18€/kWh = 546,93€/a$.

Hierzu noch die folgende Anmerkung: Um die Kosten für die Leitungsverluste zu verringern, sollte der Kabelquerschnitt entsprechend größer gewählt werden, somit wird auch der Spannungsfall geringer. Außerdem hat die Wahl der Betriebsart einen entscheidenden Einfluss auf die Verlustleistungskosten.

Berechnungen ohne Reserve und mit Selektivitätsbetrachtung

Wie bereits im vierten Teil erwähnt, sind einige der bereits errechneten Werte erneut zu bestimmen – diesmal ohne

Reserve. Daher muss die Selektivität beachtet werden.

Projektschritt 9

Gesucht wird der Betriebsstrom und der mittlere $\cos\varphi$ vom UV 2.2. Gegeben: Gleichzeitigkeitsfaktoren der Motoren = 1.

a) Für die Motoren M1 und M2 wird die Leistung berechnet: $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 21,7A \cdot 0,84 = 12,6kW$. Die Blindleistung beträgt somit:

$$\tan\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = 0,646$$

$$Q = P \cdot \tan\varphi = 12,6kW \cdot 0,646 = \underline{\underline{8,14kvar}}$$

b) Für M3 bis M6 wird die Leistung berechnet: $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 11,3A \cdot 0,84 = 6,576kW$. Die Blindleistung beträgt:

$$\tan\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = 0,646$$

$$Q = P \cdot \tan\varphi = 6,576kW \cdot 0,646 = \underline{\underline{4,25kvar}}$$

c) Für Verbraucher ist die Leistung angegeben: $P = 15kW$. Zunächst wird

die Blindleistung wird berechnet:

$$\tan\varphi = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \frac{0,436}{0,9} = 0,484$$

$$Q = P \cdot \tan\varphi = 15kW \cdot 0,484 = \underline{\underline{7,26kvar}}$$

d) Die Gesamtleistung beträgt: $P_G = 12,6kW \cdot 2 + 6,576kW \cdot 4 + 15kW = 66,5kW$. Die Gesamtblindleistung beträgt: $Q_G = 8,16kvar \cdot 2 + 4,25kvar \cdot 4 + 7,26kvar = 40,6kvar$. Der mittlere $\cos\varphi$ errechnet sich damit zu:

$$\tan\varphi = \frac{Q_{ges}}{P_{ges}} = \frac{40,6kvar}{66,5kW} = 0,61$$

$$\cos\varphi = \frac{\sin\varphi}{\tan\varphi} = \frac{0,52}{0,61} = \underline{\underline{0,853}}$$

Nun wird der Betriebsstrom berechnet:

$$I_b = \frac{P_G}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{66,5kW}{\sqrt{3} \cdot 400V \cdot 0,853} = \underline{\underline{112,4A}}$$

Es ergibt sich ein Betriebsstrom von 112,4A, der zum UV2.2 fließt.

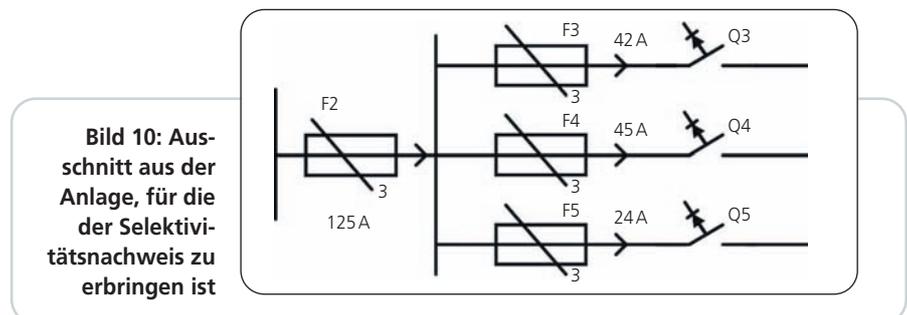


Bild 10: Ausschnitt aus der Anlage, für die der Selektivitätsnachweis zu erbringen ist

Projektschritt 10

Gesucht wird der Selektivitätsnachweis für die Sicherungen F2 bis F5 und die RCD Q3 bis Q5 (Bild 10). Zu den Sicherungsgrößen berechnet man hierfür die Abschaltströme:

- F2 → 125 A
- F3 → 63 A (50 A); $2 \cdot 21,7 A = 43,4 A$
- F4 → 63 A (50 A); $4 \cdot 11,3 A = 45,2 A$
- F5 → 63 A (50 A); 42 A
- Q3 → 63 A/100 mA
- Q4 → 63 A/100 mA
- Q5 → 63 A/100 mA

Die Selektivität der Leistungsschutzschalter ist somit nachgewiesen.

Projektschritt 11

Gesucht wird die Leistung zum UV 2.2, gegeben: Die zum Einsatz kommende Verlegeart lautet C und es soll keine PEN-Leiterreduzierung stattfinden.

a) Der thermisch erforderliche Querschnitt ergibt sich zu: $I_{F2} = I_n = 125 A$. Nach DIN VDE 0298-4 ergibt sich für Verlegeart C: $S = 35 mm^2$ und $I_z = 126 A$ und $I_b \leq I_n \leq I_z$; $I_b \leq 125 A \leq 126 A$.

b) Nun berechnen wir den erforderlichen Querschnitt – unter Berücksichtigung des Spannungsfalls. Der zulässige Spannungsfall beträgt: $\Delta u = 0,5\%$. Damit wird der Querschnitt berechnet:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot I_n \cdot \cos \varphi \cdot 1,12_{50^\circ C}}{\kappa \cdot \Delta U} = \frac{\sqrt{3} \cdot 30m \cdot 125A \cdot 0,854 \cdot 1,12}{56 \frac{m}{\Omega mm^2} \cdot 2V} = \underline{\underline{55,47 mm^2}}$$

→ gewählt: 70 mm² – d.h. ein Kabel NYY-J 4x70, ohne PEN-Reduzierung.

c) Anhand der gewählten Leitung bestimmen wir nun den tatsächlichen Spannungsfall:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot I_n \cdot \cos \varphi \cdot 1,12_{50^\circ C}}{\kappa \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 30m \cdot 125A \cdot 0,854 \cdot 1,12}{56 \frac{m}{\Omega mm^2} \cdot 70 mm^2} = \underline{\underline{1,58V}}$$

$$\Delta u = 100\% \cdot \frac{\Delta U}{U_n} = 100\% \cdot \frac{1,58V}{400V} = \underline{\underline{0,395\%}}$$

Projektschritt 12

Gesucht wird der Bemessungsstrom zum HV2 und der Sicherung F1. Der Betriebsstrom am HV2 beträgt: $I_{b,HV2} = I_{b,F2,1} + I_{b,F2,2} = 125 A + 50 A = 175 A$. Der Betriebsstrom der Sicherung F1 beträgt: $I_{b,F1} = 200 A$ (gG). Die Selektivität lässt sich nun berechnen mit: $I_{b,F1} / I_{b,HV2} = 200 A / 175 A = 1,6$.

Hierzu folgende Anmerkung: Der berechnete Wert 1,6 ist der Mindestwert, um Selektivität erreichen zu können.

Projektschritt 13

Gesucht wird die Leitung zum HV2, gegeben: Kabel mit PEN-Reduzierung; Verlegungsart Rohr in Erde.

a) Gesucht ist der thermisch erforderliche Querschnitt bei einem Betriebsstrom von: $I_{AF1} = I_n = 200 A$. Nun werden die Reduktionsfaktoren festgelegt. Für die Verlegeart D, Rohrverlegung $f_1 = 0,85$. Für den Dauerbetrieb: $f_2 = 0,91$. Damit ergibt sich ein rechnerischer

Gesamtreduktionsfaktor von $f_{ges} = f_1 \cdot f_2 = 0,77$. Als Nächstes soll die Strombelastbarkeit bestimmt werden. Für einen Bemessungsstrom von: $I_r = 275 A$ beträgt die Strombelastbarkeit $I_z = I_r \cdot f_{ges} = 275 A \cdot 0,77 = 212 A$. Hieraus ermitteln wir noch den Querschnitt des Kabels → NYCWY 3 x 95/50 mm² (nach DIN VDE 0102). Anmerkung: Der kleinere Querschnitt, hier 50 mm², stellt die PEN-Reduzierung dar.

b) Gesucht ist der unter Berücksichtigung des Spannungsfalls von 1 % erforderliche Querschnitt. Folgende Berechnungsschritte sind hierzu erforderlich:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot I_{AF1} \cdot \cos \varphi \cdot 1,12_{50^\circ C}}{\kappa \cdot \Delta U} = \frac{\sqrt{3} \cdot 51m \cdot 200A \cdot 0,9 \cdot 1,12}{56 \frac{m}{\Omega mm^2} \cdot 4V} = \underline{\underline{79,5 mm^2}}$$

→ gewählt wird ein Querschnitt von: 95 mm².

c) Die gewählte Leitung und der tatsächliche Spannungsfall werden nun berechnet:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot I_{AF1} \cdot \cos \varphi \cdot 1,12_{50^\circ C}}{\kappa \cdot S} = \frac{\sqrt{3} \cdot 51m \cdot 200A \cdot 0,9 \cdot 1,12}{56 \frac{m}{\Omega mm^2} \cdot 95 mm^2} = \underline{\underline{3,34V}}$$

$$\Delta u = 100\% \cdot \frac{3,6V}{400V} = \underline{\underline{0,835\%}}$$

Projektschritt 14

Gesucht wird der verfügbare Spannungsfall ab UV2.2. Der noch verfügbare Spannungsfall beträgt: $\Delta u_{Anlage} - \Delta u_{HV2} - \Delta u_{UV2.2} = 4\% - 0,835\% - 0,935\% = 2,77\%$ Reserve.

Projektschritt 15

Gesucht wird die Anzahl der zulässigen Wohneinheiten (WE), welche die HV1 versorgt. Gegeben: WE-Anzahl mit und ohne Warmwasserbereitung bei einem zur Verfügung stehenden Betriebsstrom von: $I_n = I_{F2} = 125 A$. Der Leistungsbedarf beträgt: $P_G = 86 kVA$. Abgelesen aus dem angezeigten Diagramm (Bild 11) für die Anzahl der Wohneinheiten (WE):

- ohne elektr. Warmwasserbereitung → 36 WE
- mit elektr. Warmwasserbereitung → 5 ... 6 WE.

Projektschritt 16

Gesucht werden die Transformatordaten S_{Tr} , I_{Tr} , R_{Tr} , X_{Tr} , Z_{Tr} sowie der Gesamt-

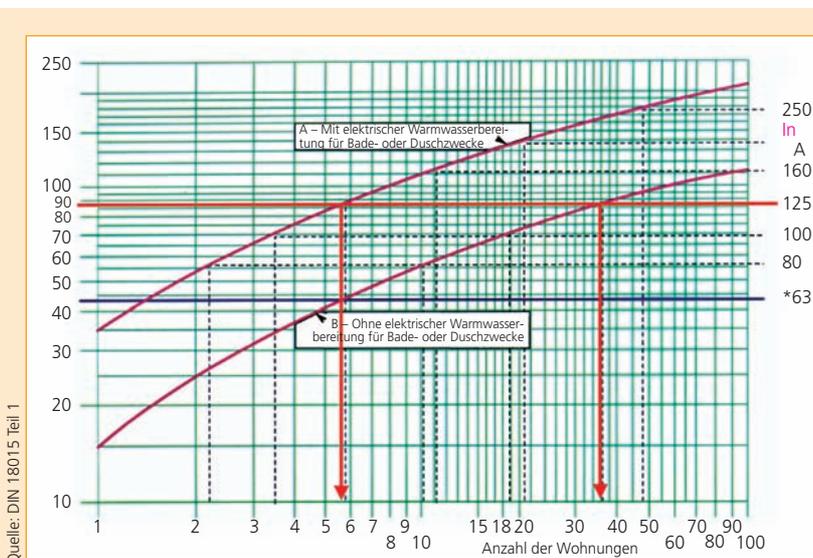


Bild 11: Ermittlung des Leistungsbedarfs für Wohnungen mit und ohne elektrischer Warmwasserbereitung



betriebsstrom der Anlage und Auslegung des Transformators. Gegeben ist hier: $u_{kr} = 6\%$.

Der Bemessungsstrom des Transformators beträgt: $I_{bG} = I_{F1} + I_{F2} + I_{F5} = 125\text{ A} + 200\text{ A} + 25\text{ A} = 350\text{ A}$. Nun wird die Scheinleistung berechnet mit: $S_{rT} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400\text{ V} \cdot 350\text{ A} = 242\text{ kVA}$. Gewählt wird jetzt: $S_{rT} = 250\text{ kVA}$, 20/0,4kV, 50Hz, Y_{25} (Dyn5), Daraus ergibt sich der tatsächliche Bemessungsstrom:

$$I_{rT} = \frac{S_{rT}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{250\text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400\text{ V}} = \underline{\underline{360,8\text{ A}}}$$

Die Impedanz des Transformators:

$$\begin{aligned} Z_T &= u_{kr} \cdot \frac{U_n^2}{S_{rT}} = \\ &= 0,06 \cdot \frac{(400\text{ V})^2}{250\text{ kVA}} = \underline{\underline{38,4\text{ m}\Omega}} \end{aligned}$$

Aus *Kasicki, I: »Projektierung von Niederspannungs- und Sicherheitsanlagen«, Hüthig&Pflaum Verlag, 2003, Bild 13.11.*, werden folgende Werte ermittelt:

- induktiver Widerstand $X_T = 36\text{ m}\Omega$
- Wirkwiderstand $R_T = 9\text{ m}\Omega$

Die tatsächliche Impedanz des Transformators:

$$\begin{aligned} Z_T &= \sqrt{R_T^2 + X_T^2} = \\ &= \sqrt{9\text{ m}\Omega^2 + 36\text{ m}\Omega^2} = \underline{\underline{37,1\text{ m}\Omega}} \end{aligned}$$

Hierzu noch die folgende Anmerkung: Die Werte für den induktiven Widerstand und den Wirkwiderstand können auch aus einem Diagramm für Wirk- und Blindwiderstände von Transformatoren abgelesen werden. Angaben direkt vom Hersteller sind jedoch genauer.

Projektschritt 17

Gesucht wird der drei- und einpolige Kurzschlussstrom sowie der Stoßkurzschlussstrom am Transformator. Zu berechnen ist:

- dreipoliger Kurzschlussstrom: $I_{KD} = 100\% / 6\% \cdot I_{rT} = 6000\text{ A} = 6\text{ kA}$
- zweipoliger Kurzschlussstrom: $I''_{K1} = \sqrt{3}/2 \cdot I_{KD} = \sqrt{3}/2 \cdot 6000\text{ A} = 5196\text{ A} = 5,2\text{ kA}$
- Stoßkurzschlussstrom: $i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_K$

Aus dem Diagramm im **Bild 12** entnehmen wir den Faktor κ zur Berechnung des Stoßkurzschlussstroms. Zum Ablesen auf der x-Achse berechnen wir den Wert: $R_T / X_T = 9\text{ m}\Omega / 36\text{ m}\Omega = 0,25$. Hiermit kann man jetzt ablesen: $\kappa = 1,4$. Der Stoßkurzschlussstrom beträgt $i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_K = 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 6\text{ kA} = 11,87\text{ kA}$

Anmerkung: Der Stoßkurzschlussstrom ist der maximale Kurzschlussstrom, der von der Anlage aufgenommen werden kann.

Projektschritt 18

Gesucht wird jetzt die Schleifenimpedanz.

a) Die Schleifenimpedanz des HV beträgt:

$$Z_{s,HV} = \sqrt{(R_T + R_L)^2 + (X_T + X_L)^2}$$

Der Wert für R_L ist nicht gegeben und muss noch berechnet werden:

ERMITTLUNG DER VERTEILERGRÖSSE

Anzahl (Stück)	Einbauteil	Teilungseinheiten	Summe
5	D02 3-P	4,5TE	23TE
3	RCD 4-P	4TE	12TE
12	LS 16 A	1TE	12TE
4	MSS	4TE	16TE
1	Steckdosen	3TE	3TE
10	Klemmen	1TE	10TE
4	Klemmen 70mm ²	1 Reihe	12TE
		Summe	88TE

Tabelle 9: Aus der Breite der Einbaugeräte zuzüglich der Reserve ergibt sich die Anzahl der Teilungseinheiten (TE)

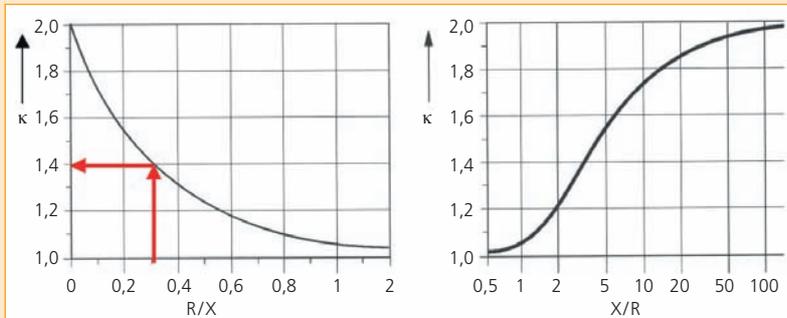


Bild 12: Diagramm zur Ermittlung des Stoßkurzschlussstroms

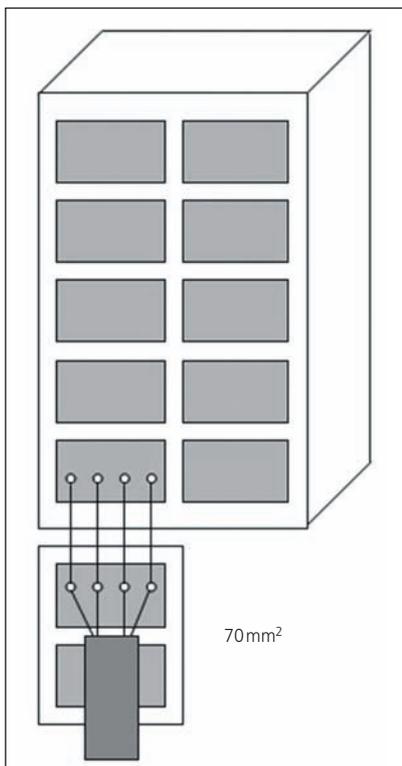


Bild 13: Darstellung des Aufbauplans vom UV 2.2

$$R_L = \left(\frac{l}{\kappa \cdot S} + \frac{l}{\kappa \cdot S_{PEN}} \right) \cdot 1,56_{160^\circ C} = \left(\frac{51m}{56 \frac{m}{\Omega mm^2} \cdot 95mm^2} + \frac{51m}{56 \frac{m}{\Omega mm^2} \cdot 50mm^2} \right) \cdot 1,56 = 43,37m\Omega$$

Der Wert für X_L muss ebenfalls noch berechnet werden:

$$X_L = 2 \cdot l \cdot x'_L = 2 \cdot 51m \cdot 0,082 \frac{m\Omega}{m} = 8,36m\Omega$$

Benötigt wird nun noch $X'_{L'}$, dies ergibt sich aus DIN EN 60909: für 95mm² und NYCWY → 0,082 mΩ/m.

Die Schleifenimpedanz beträgt:

$$Z_{S,HV} = \sqrt{(9m\Omega + 43,37m\Omega)^2 + (36m\Omega + 8,36m\Omega)^2} = 68,63m\Omega$$

b) Schleifenimpedanz des UV:

$$Z_{S,UV} = \sqrt{(R_T + R_{L,HV} + R_{L,UV})^2 + (X_T + X_{L,HV} + X_{L,UV})^2}$$

Berechnet wird jetzt der Wert für $R_{L,UV}$:

$$R_{L,UV} = \frac{2 \cdot l}{\kappa \cdot S} \cdot 1,56_{160^\circ C} = \frac{2 \cdot 30m}{56 \frac{m}{\Omega mm^2} \cdot 70mm^2} \cdot 1,56 = 23,88m\Omega$$

Der Wert für $X_{L,UV}$ wird ebenfalls berechnet:

$$X_{L,UV} = 2 \cdot l \cdot x'_L = 2 \cdot 30m \cdot 0,082 \frac{m\Omega}{m} = 4,92m\Omega$$

Die Schleifenimpedanz des UV beträgt:

$$Z_{S,UV} = \sqrt{(9m\Omega + 43,37m\Omega + 23,88m\Omega)^2 + (36m\Omega + 8,36m\Omega + 4,92m\Omega)^2} = 90,79m\Omega$$

Projektschritt 19

Gesucht werden die Werte für den Schutz durch Abschalten. Der Fehlerstrom am HV beträgt:

$$I_{F,HV} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{S,HV}} = \frac{0,95 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 68,63m\Omega} = 3,2kA$$

Der Spannungsfaktor c wird aus Tabellen ermittelt. Kontrolle: aus der Zeit-Strom-Kennlinie für gG-Sicherungen: Für die Angaben: Abschaltzeit $t = 5s$ und $I_{bF1} = 200A$, ergibt sich → $I_{A,5s} = 1500A$, $I_{F,HV} > I_{A,5s}$ bis UV2.2. Ergibt sich ein Fehlerstrom am HV von:

$$I_{F,UV} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{S,UV}} = \frac{0,95 \cdot 400V}{\sqrt{3} \cdot 90,79m\Omega} = 2,42kA$$

Aus der Zeit-Strom-Kennlinie für gG-Sicherungen ergeben sich Abschaltzeit $t = 5s$ und $I_{bF1} = 125A$ → $I_{A,5s} = 750A$, $I_{F,UV} > I_{A,5s}$ → In beiden Fällen ist die Bedingung $I''_{K1min} > I_a$ erfüllt.

Nun einige Vorschläge, was man tun kann, wenn der Schutz durch Abschalten nicht erfüllt wird:

- Transformator mit Spannungsfall $u_k = 4\%$ wählen
- den Kabelquerschnitt erhöhen
- Leistungsschalter mit RCD statt Sicherungen

- die Verteilung entsprechend schutzisoliert aufstellen.

Projektschritt 20

Gesucht: Reihenanzahl im UV 2.2 mit 30 % Reserve. In **Tabelle 9** ist dieser Schritt vollzogen.

Projektschritt 21

Gesucht: Zeichnung des Bauplans für den UV 2.2. Bemessung des Verteilers:

- Anzahl der Teilungseinheiten: 88 Teilungseinheiten + 30 % Reserve = 115 Teilungseinheiten
 - Anzahl der Reihen: 115 Teilungseinheiten : zwölf Teilungseinheiten/Reihe = zehn Reihen
 - Gewählt: zwei Felder mit je fünf Reihen
 - Größe des Verteilers: B x H x T = 550 x 800 x 200 mm
- Das **Bild 13** zeigt die Darstellung des UV 2.2

Berechnungen auf TT-System anwendbar?

Für eine Abschaltung im **TN-System** innerhalb der vorgegebenen Zeit muss ein hoher Kurzschlussstrom fließen. Bei nicht erfüllter Abschaltbedingung muss

- der Bemessungsstrom der Überstrom-Schutzeinrichtung (ÜSE) verringert werden oder
- eine RCD bzw. ein zusätzlicher Potentialausgleich vorgesehen werden.

Im **TT-System** sind die Stromquelle und die Betriebsmittel geerdet. Die Abschaltung durch ÜSE ist schwierig (vorwiegend werden RCD eingesetzt). Es gilt:

- Das TN-System darf nicht mit dem TT-System kombiniert werden.
- Im TT-System müssen alle Stromkreise mit einer RCD versehen werden.
- Der Erdungswiderstand des TT-Systems muss berechnet und gemessen werden.

Weitere Planungsschritte

Im letzten Beitragsteil werden wir uns mit den Installations- und Übersichtsschaltplänen der vollzogenen Planungsschritte befassen und vergleichen die erzielten Rechenergebnisse mit denen der Software »Simaris«.

(Fortsetzung folgt)

Prof. Dr. Ismail Kasikci,
Hochschule Biberach



MEHR INFOS

Vorangegangene Beitragsteile

Kasikci, I.; Pantenburg, N.: Elektroanlagen planen und projektieren

- Teil 1: Grundlagen und Ausgangssituation, »de« 19/2008, S. 26 ff.
- Teil 2: HOAI – das Grundgesetz des Planers, »de« 20/2008, S. 38 ff.
- Teil 3: Anschlussdaten und Zähleranlagen, »de« 21/2008, S. 30 ff.
- Teil 4: Projekt Lagerhalle, »de« 7/2009, S. 28 ff.