Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 1

Artikel: Qualifikation von leittechnischen Komponenten für das Kernkraftwerk Leibstadt

Autor: Allgäuer, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904739

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Qualifikation von leittechnischen Komponenten für das Kernkraftwerk Leibstadt

F. Allgäuer

Elektronische Steuerungen für sicherheitstechnisch wichtige Systeme müssen gemäss den gültigen Vorschriften und Behördenauflagen qualifiziert werden. Die Typenprüfungen und die anlagenspezifischen Prüfungen werden beschrieben. Besonders erwähnt werden spezielle Rüttelversuche im Zusammenhang mit der Erdbebensicherheit sowie Massnahmen gegen Überspannungen.

Les commandes électroniques de systèmes dont la sécurité a une grande importance doivent être conformes aux prescriptions et ordonnances en vigueur. Les essais de type et ceux qui concernent l'installation sont décrits, notamment les essais de vibration (sécurité dans le cas de tremblements de terre), ainsi que les dispositions relatives aux surtensions.

1. Einleitung

Das Kernkraftwerk Leibstadt, am schweizerischen Rheinufer bei Leibstadt im Kanton Aargau gelegen, ist mit einem Siedewasserreaktor für eine elektrische Leistung von 940 MW ausgerüstet (Fig. 1). Die Nebenanlagen dieses Kernkraftwerkes sind liefermässig zu einem unabhängigen Los zusammengefasst, zu dem auch drei sicherheitstechnisch wichtige, gegenseitig redundant aufgebaute Notstromdiesel- und Notkühlwasseranlagen A, B und C gehören (Fig. 2).

Das Notkühlwasser und die elektrische Energie aus diesen Anlagen werden über die in Figur 2 eingezeichneten Rohrleitungs- und Kabelkanäle zu den Reaktorhilfsanlagen im schlüsselfertigen Los geführt. Für die Steuerung, Regelung und Überwachung der Nebenanlagen wurde 1975 ein einheitliches Leittechniksystem, bestehend aus den elektronischen Siemens-Gerätefamilien Simatic und Teleperm C, ausgewählt.

Die in der Schweiz zuständige Sicherheitsbehörde hat 1977 festgelegt, dass alle elektrischen Einrichtungen in Sicherheitssystemen des KKW Leibstadt gemäss den amerikanischen IEEE-Vorschriften zu qualifizieren sind. Diese Festlegung fiel zum Teil bereits in die Projektierungsphase der betroffenen Einrichtungen; daher wurde dem Betreiber das Recht eingeräumt, in einzelnen Fällen begründete Ausnahmen zu beantragen.

Basierend auf diesen Behördenauflagen wurde die Qualifikation der elektronischen Steuerungen für die Notstromdiesel- und Notkühlwasseranlagen innerhalb eines Zeitraumes von etwa zwei Jahren durchgeführt. Über diese Qualifikation, die einen komponentenspezifischen und einen anlagespezifischen Teil umfasst, wird im folgenden berichtet.

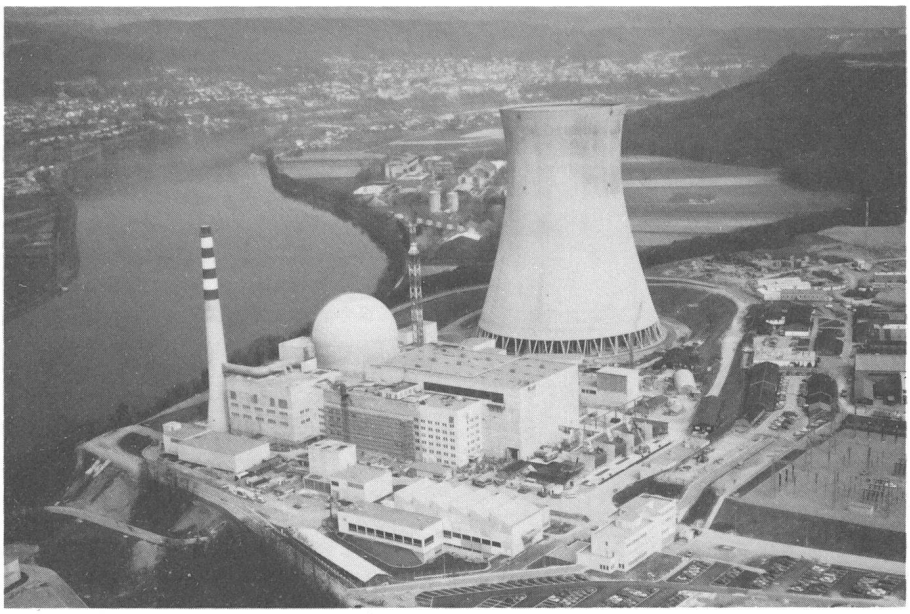

Fig. 1 Luftaufnahme des Kernkraftwerkes Leibstadt (April 1982)

Adresse des Autors
F. Allgäuer, dipl. Ing. ETHZ, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Bellerivestrasse 34, 8022 Zürich.

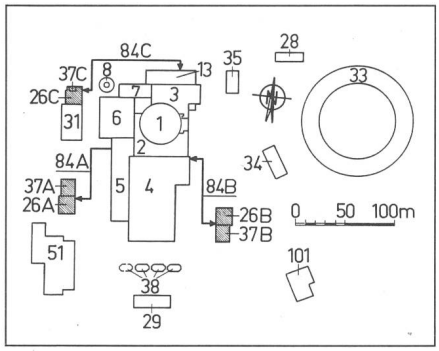

Fig. 2 Situationsplan des Kernkraftwerkes Leibstadt

Schlüsselfertiges Los

1 Reaktorgebäude
2 Reaktorhilfsanlagen-Gebäude
3 Brennelement-Lagergebäude
4 Maschinenhaus
5 Betriebsgebäude
6 Aufbereitungsgebäude
7 Abgasfiltergebäude
8 Abluftkamin
13 Heisse Werkstatt

Unabhängiges Los

26 Notstromdieselanlagen A, B, C
28 Vollentsalzungsanlage
29 50-kV-Innenraumschaltanlage
31 Zwischenlager für radioaktive Rückstände
33 Kühlturm
34 Hauptkühlwasseranlage
35 Kühlturm-Zusatzwasseraufbereitung
37 Notkühlwasseranlagen A, B, C
38 Haupt- und Hilfstransformatorenanlage
51 Werkstatt, Lager
84 Rohrleitungs- und Kabelkanäle
101 Informationszentrum

2. Komponentenspezifische Qualifikation

Gemäss IEEE Standard 323 [1][1]) muss nachgewiesen werden, dass die in Sicherheitssystemen eingesetzten Komponenten ihre bestimmungsgemässe Funktion erfüllen. Als bevorzugte Methode für diesen Nachweis wird die Durchführung von Typenprüfungen verlangt, deren Ablauf ebenfalls in IEEE Standard 323 spezifiziert ist (Tabelle I).

Für die Notstromdiesel- und Notkühlwassersteuerungen wurden 35 verschiedene Typen von elektronischen Baugruppen eingesetzt. 12 von diesen 35 Baugruppen waren bereits für andere Kernkraftwerke nach demjenigen Verfahren, das in der Bundesrepublik Deutschland angewendet wird, typengeprüft (Eignungsprüfungen nach KTA-Regel 3501 [2][2]). Im vorliegenden Falle erfolgten diese Eignungsprüfungen nach KWU-internen[3]), vom TÜV[4]) genehmigten Spezifikationen, die an den später erstellten KTA-Regelentwurf 3503 [3] angelehnt sind.

Die schweizerische Sicherheitsbehörde hat die in Deutschland durchgeführten Eignungsprüfungen anerkannt und dem Antrag des Betreibers zugestimmt, die noch nicht typengeprüften Baugruppen nach deutschen Spezifikationen prüfen zu lassen. Diese Spezifikationen verlangen, dass eine theoretische und eine praktische Prüfung durchgeführt werden.

Die theoretische Prüfung besteht im wesentlichen aus einer Grenzbelastungsanalyse und einer Ausfalleffektanalyse. Die Grenzbelastungsanalyse soll zeigen, dass auch bei ungünstigster Kombination der Einflussgrössen (Bauelementetoleranzen, Hilfsenergie, Eingangssignal, Ausgangsbelastung, Umgebungsbedingungen) die Funktionsfähigkeit der Baugruppe gegeben ist. In der Ausfalleffektanalyse wird untersucht, wie sich Ausfälle der Bauelemente (Leerlauf, Kurzschluss) auf die Funktion der Baugruppe auswirken.

Der praktische Teil der Typenprüfung umfasst 11 Prüfschritte, die verschiedene elektrische, mechanische und klimatische Beanspruchungen abdecken (Tabelle II). Bei der Durchführung der praktischen Prüfung muss die spezifizierte Reihenfolge der Prüfschritte eingehalten werden. Die praktische Prüfung von 23 Flachbaugruppen nach Tabelle II wurde gleichzeitig in drei verschiedenen Labors durchgeführt; sie dauerte ungefähr ein halbes Jahr und kostete rund eine halbe Million Schweizer Franken. Die Typenprüfungen konnten Mitte 1982 abgeschlossen werden, ohne dass systematische Fehler oder Beeinträchtigungen an den geprüften Baugruppen auftraten.

3. Anlagenspezifische Qualifikation

Der komponentenspezifische Teil der Qualifikation muss gemäss Vorschriften durch anlagenspezifische Störfallanalysen ergänzt werden. Dies bedeutet, dass der Einfluss der anlagen- und standortspezifischen Parameter auf die leittechnischen Einrichtungen berücksichtigt werden muss.

Die drei redundanten Notstromdiesel- und Notkühlwasseranlagen A, B und C sind durch Distanzen von etwa 100 m voneinander getrennt und mechanisch und elektrisch vollständig unabhängig. Durch dieses Konzept wird erreicht, dass verschiedene Störfälle wie z.B. Flugzeugabsturz, Brand

Ablauf von Typenprüfungen nach IEEE Standard 323–1974 Tabelle I

1. Sichtkontrolle
2. Funktionskontrolle unter Nennlastbedingungen
3. Funktionskontrolle unter Grenzlastbedingungen
4. Alterung
5. Mechanische Prüfung (Seismik, Vibration)
6. Funktionskontrolle unter simulierten Störfallbedingungen
7. Funktionskontrolle unter simulierten Bedingungen nach Eintreten eines Störfalles
8. Sichtkontrolle, Demontage

Ablauf der praktischen Typenprüfung in Anlehnung an KTA-Regelentwurf 3503 Tabelle II

Prüfschritte 1, 2, 3	Isolations- und Sichtprüfungen
Prüfschritt 4a	Funktionsprüfung unter Nenn- und Grenzlastbedingungen
Prüfschritt 4b	Funktionsprüfung bei induzierten Spannungen (Störbeeinflussung)
Prüfschritte 5, 6, 7	Mechanische Prüfungen (Seismik, Stoss, Vibration)
Prüfschritt 8	Klimatische Prüfung (Temperatur, Feuchtigkeit)
Prüfschritt 9	Wiederholung von Prüfschritt 4a
Prüfschritt 10	1000 Stunden Langzeittest (zyklischer Wechsel der Umgebungstemperatur und der Versorgungsspannung)
Prüfschritt 11	Wiederholung von Prüfschritt 4a

[1]) IEEE = The Institute of Electrical and Electronics Engineers (USA)
[2]) KTA = Kerntechnischer Ausschuss (BRD)
[3]) KWU = Kraftwerk Union (BRD)
[4]) TÜV = Technischer Überwachungs-Verein

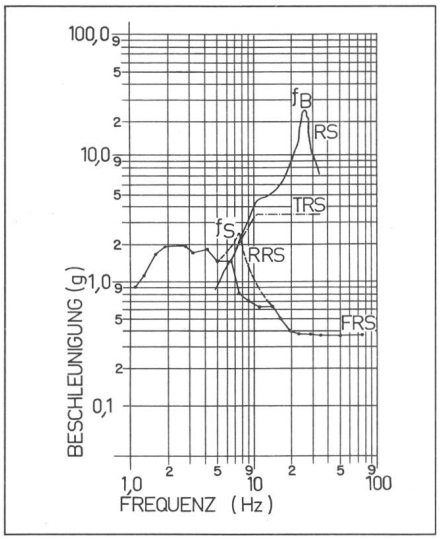

Fig. 3 Grafische Darstellung der Erdbebenspektren in horizontaler Richtung, parallel zur Schrankfront

FRS Floor-Response-Spektrum am Aufstellungsort der Elektronikschränke
RRS Required-Response-Spektrum für die Schrankeinbauten
TRS Test-Response-Spektrum für die Schrankeinbauten
RS Response-Spektrum der Baugruppenträger
f_S Resonanzfrequenz des Elektronikschrankes
f_B Resonanzfrequenz des Baugruppenträgers

und Einwirkung Dritter auf einen Teil der redundanten Anlagen beschränkt bleiben.

Im Rahmen der Qualifikation mussten deshalb nur die folgenden Störfälle bzw. Störungen, die sich auf die Steuerungen von mehr als einer Redundanz auswirken können, untersucht werden:
- Erdbeben
- Einkopplung von Überspannungen bei Blitzeinschlägen
- Einkopplung von Überspannungen aus Starkstromkabeln

3.1 Erdbeben

Die verschiedenen Beschleunigungen, die im Falle eines Erdbebens auftreten, sind in Figur 3 für die Horizontalachse, parallel zur Schrankfront, dargestellt. Diese Achsrichtung wurde als Beispiel gewählt, weil dabei die grössten Resonanzüberhöhungen auftraten.

Die Beschleunigungen am Aufstellungsort der Elektronikschränke sind aus dem Floor-Response-Spectrum ersichtlich. Das FRS wird mit Hilfe von Schwingungsmodellen für die Gebäude aus den standortspezifischen Erdbebenbeschleunigungen berechnet.

Um die Erdbebenfestigkeit der eingesetzten Elektronikschränke nachzuweisen, wurden diese auf einem Rütteltisch getestet (Fig. 4). Dieser erlaubte die gleichzeitige Simulierung des zeitlich richtigen Erdbebenverlaufes in allen drei Achsrichtungen. Dabei wurden auch die Eigenresonanzen der Schränke und die entsprechenden Resonanzüberhöhungen gemessen.

Aus dem FRS und den Resonanzüberhöhungen der Elektronikschränke resultiert die geforderte Beanspruchung der Schrankeinbauten, das Required-Response-Spectrum (RRS). Figur 3 zeigt, dass das RRS höher liegt als die Beschleunigung von etwa 1*g*, mit der die Einbauten bei den Eignungsprüfungen getestet wurden [3]. Es war daher notwendig, zusätzliche Rüttelversuche an den Einbauten mit einem entsprechend höheren Test-Response-Spectrum durchzuführen. Das TRS soll gemäss IEEE-Standard 344 [4] 10%, bei Komponenten mit mehr als einer Resonanzfrequenz 50% über dem RRS liegen.

Bei den Rüttelversuchen wurden die bestückten und verdrahteten Baugruppenträger mit einem Gleitsinus von 3,5*g* und einer Änderungsgeschwindigkeit von 2 Oktaven/min in allen drei Achsrichtungen geprüft (Fig. 5). Bei diesen Messungen zeigten die Baugruppenträger eine Eigenresonanz bei etwa 25 Hz mit entsprechenden Beschleunigungsüberhöhungen bis zu 30*g* (Fig. 3). Obwohl diese Resonanzstelle bei den Tests mehrmals durchlaufen wurde, konnten an den betroffenen Komponenten keine Funktionsfehler oder Zerstörungen festgestellt werden.

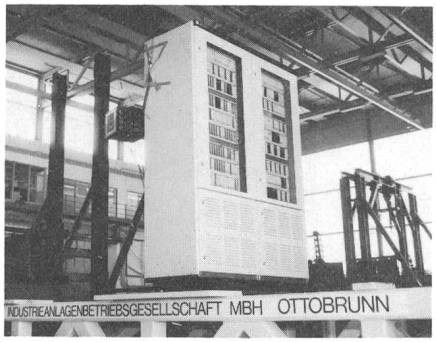

Fig. 4 Elektronikschränke mit gewichtsäquivalenter Baugruppenbestückung auf dem Rütteltisch

(System MNS, BBC)

3.2 Blitzschutz

Bei Blitzeinschlägen im Bereich des Reaktors können Überspannungen in diejenigen Steuerkabel, die die Anlagen des unabhängigen und des schlüsselfertigen Loses miteinander verbinden, eingekoppelt werden (Fig. 2, Kabelkanäle 84 A, B und C). Die Ursache dieser Überspannungen ist die Potentialanhebung der vom Blitz getroffenen Gebäude gegenüber den aussenliegenden Notstromdiesel- und Notkühlwasseranlagen.

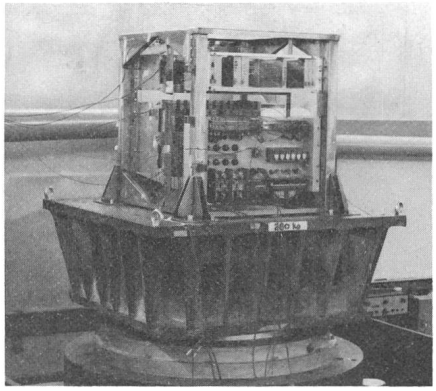

Fig. 5 Rütteltisch mit auf Rack montierten Schrankeinbauten

Oben vorne:
Baugruppenträger (eine Etage), bestückt mit elektronischen Steckbaugruppen

Unten vorne:
Einschub für die Spannungsversorgung der Elektronikschränke

Bei Siemens durchgeführte Messungen an einer vergleichbaren Anordnung zeigen, dass die induzierten Spannungen schon bei 30 m langen Kabelverbindungen zwischen zwei Gebäuden die Zerstörfestigkeit der elektronischen Steuerungen erreichen bzw. überschreiten [5].

Die Zerstörgrenze der eingesetzten Elektronik liegt bei einer Längsspannung von etwa 1,5 kV und bei einer Querspannung von 150 V. Die Längsspannungsfestigkeit von etwa 1,5 kV bei Stossbeanspruchungen ergibt sich aus der 50-Hz-Isolationsfestigkeit der elektronischen Schaltungen von 500 V. Die Zerstörfestigkeit von 150 V bei

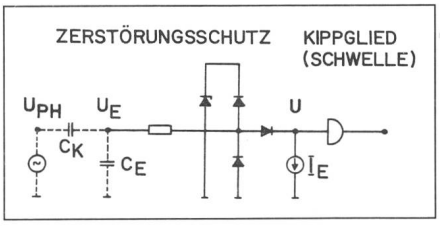

Fig. 6 Ersatzschema für die kapazitive Störspannungseinkopplung auf einen offenen Simatic-Binäreingang

U_{PH} Phasenspannung des Starkstromkabels
U_E Kapazitiv eingekoppelte Störspannung
U Störspannung am Eingang des Kippgliedes
I_E Eingeprägte Eingangsstromsenke
C_K Koppelkapazität zwischen Starkstromkabel und Steuerkabel
C_E Erdkapazität des Steuerkabels

Querspannungen wird durch einen eingebauten Zerstörungsschutz an den Ein- und Ausgängen der Simatic-Schaltkreise erreicht (Fig. 6).

Um die erwarteten Überspannungen auf zulässige Werte zu reduzieren, wurden für die sicherheitstechnisch wichtigen Verbindungen zwischen dem schlüsselfertigen und dem unabhängigen Los doppelt abgeschirmte Steuerkabel verlegt. Die innere, statische Abschirmung wird auf bekannte Art und Weise einseitig aufgelegt und sternförmig an einem Punkt geerdet. Die zusätzliche äussere Abschirmung besteht aus einem Kupfergeflecht, das beidseitig geerdet wird.

Die Reduktionswirkung dieser Abschirmung lässt sich ermitteln, indem eine gleichmässige, sternförmige Verteilung des Blitzstromes von 100 kA auf alle Steuerkabel zu den drei Redundanzen A, B und C angenommen wird. Da ungefähr 50 Steuerkabel mit doppelter Abschirmung verlegt wurden, ergibt sich ein Strom von etwa 2 kA pro Kabelschirm.

Die mittlere Kabellänge der betreffenden Kabel beträgt etwa 150 m; der Querschnitt der äusseren Abschirmung wurde so gewählt, dass ein Gleichstromwiderstand von etwa 1 mΩ/m Schirmlänge resultiert.

Bei Geflechtschirmen kann der Längsspannungsabfall direkt aus dem Blitzstrom und dem Gleichstromwiderstand der Abschirmung berechnet werden [6]. Somit ergibt die Berechnung mit den angegebenen Daten einen Wert von 300 V, der etwa um Faktor 5 unterhalb der zulässigen Zerstörgrenze liegt.

Wie die Messungen [5] zeigen, erreichen die Querspannungen bei der üblichen Leittechnik-Verkabelung weniger als 10% der Werte für die zugehörigen Längsspannungen. Daher sind auch die zu erwartenden Querspannungen etwa fünfmal niedriger als die zulässigen Grenzwerte.

Die tatsächlich auftretenden Spannungen sind noch tiefer, weil sich der Blitzstrom nicht nur auf die Kabelschirme, sondern auch auf alle anderen beidseitig geerdeten Leiter wie z.B. Schutzleiter, Rohrleitungen und Erdungsleitungen verteilen wird.

3.3 Störbeeinflussung durch Starkstromkabel

Durch die Parallelführung von Starkstromkabeln mit Steuerkabeln können unzulässige Störspannungen in die elektronischen Steuerungen eingekoppelt werden. Diese Überspannungen werden durch bestimmte Verkabelungsmassnahmen wie z.B. Abstandhaltung, Aderverdrillung und Schirmung auf ungefährliche Werte reduziert.

Die Störsicherheit der Simatic-Schaltkreise wird durch eine in allen Baugliedern mit Speicherverhalten eingebaute Verzögerungszeit von etwa 3 ms bestimmt. Dadurch sind Simatic-Steuerungen gegen mittel- und hochfrequente Störspannungen immun, solange die Zerstörgrenze nicht überschritten wird [7]. Dies ist aber nur in speziellen Fällen, wie z.B. bei enger Kopplung der Steuerkabel mit Schütz-Steuerleitungen oder bei langen Kabelverbindungen und hohen Blitzschutzanforderungen, möglich. Der kritische Fall der Störbeeinflussung liegt daher nicht im Bereich höherer Frequenzen, sondern ist durch die kapazitive Einkopplung von 50-Hz-Spannungen aus Starkstromkabeln gegeben.

Ein Ersatzschema für diese Spannungseinkopplung in einen offenen Binäreingang ist in Figur 6 dargestellt. Diejenige Ladung, die während dem Anstieg der Sinushalbwelle von der Stromsenke I_E nicht mehr abgebaut werden kann, führt zu einem Ansteigen der Spannung U_E und damit auch der Spannung U. Erreicht die Spannung U einen Wert von etwa 7 V während mehr als etwa 3 ms, so führt dies zu einem Ansprechen des nachgeschalteten Kippgliedes und damit zu einem Fehlsignal. Damit keine Störung möglich wird, muss also $dU_E/dt < 0$ werden. Die Berechnung der Schaltung in Figur 6 nach diesem Kriterium ergibt folgende Beziehung:

$$\sqrt{2} \cdot U_{PH} \cdot C_K \cdot 2\pi f < I_E$$

Bei der Eingangsschaltung für binäre Geber beträgt der Wert der Eingangsstromquelle I_E etwa 2,5 mA.

Für die Koppelkapazität pro Meter Parallelführungslänge wurden rechnerisch und experimentell folgende Richtwerte ermittelt:

- $C_k' \approx 100$ pF/m, falls Steuerkabel und Starkstromkabel direkt nebeneinander verlegt sind.
- $C_k' \approx 20$ pF/m, falls ein Abstand ≧ 10 cm zwischen Steuerkabel und Starkstromkabel eingehalten wird.

Mit diesen Daten lässt sich für verschiedene Spannungsebenen und Kabelabstände die maximal zulässige Parallelführungslänge zwischen Steuerkabel und Starkstromkabel berechnen. Wird diese Länge überschritten, so müssen abgeschirmte Steuerkabel verwendet werden.

Im KKW Leibstadt wird zwischen Niederspannungskabeln und Steuerkabeln ein Abstand von 30 cm und zwischen Hochspannungskabeln und Steuerkabeln ein Abstand von 60 cm eingehalten. In den Notstromdiesel-/Notkühlwasseranlagen werden die Spannungsebenen 380 V und 6,6 kV verwendet. Damit resultieren ungefähr folgende maximal zulässige Parallelführungslängen zwischen Starkstromkabeln und Steuerkabeln:

$U_N = 380$ V : $l < 1250$ m
$U_N = 6{,}6$ kV : $l < 70$ m

Diese Kabellängen wurden im Bereich des unabhängigen Loses nirgends überschritten. Somit ist die Verwendung normaler, nicht abgeschirmter Steuerkabel gerechtfertigt. Nur für die über 100 m langen Kabelverbindungen zwischen den Notstromdiesel-/Notkühlwasseranlagen und dem schlüsselfertigen Los wurden, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, doppelt abgeschirmte Steuerkabel eingesetzt.

Literatur

[1] Standard for qualifying class 1E electric equipment for nuclear power generating stations. IEEE Standard 323-1974.

[2] Reaktorschutzsystem und Überwachung von Sicherheitseinrichtungen. KTA Regel 3501, Fassung 3/77. Herausgegeben vom Kerntechnischen Ausschuss, Essen. Köln, Carl-Heymanns-Verlag, 1977.

[3] Gerätespezifische Eignungsprüfung von elektrischen Baugruppen des Reaktorschutzsystems. KTA Regel 3503, Fassung 3/81 (Entwurf). Herausgegeben vom Kerntechnischen Ausschuss, Essen. Köln, Carl-Heymanns-Verlag, 1981.

[4] Recommanded practices for seismic qualification of class 1E equipment for nuclear power generating stations. IEEE Standard 344-1975.

[5] *F. Pigler* und *R. Terzer:* Blitzschutz in Kernkraftwerken. Siemens-Energietechnik 3(1981)10, S. 336...339.

[6] *H. Neuhaus* und *F. Pigler:* Blitzkennwerte als Grundlage der Bemessung von Blitzschutzmassnahmen. ETZ 103(1982)9, S. 463...467.

[7] *W. Ritter* und *U. Schäff:* Integrierte Schaltungen der störsicheren und zerstörsicheren Logik (SZL). Siemens-Zeitschr. 48(1974)Beiheft «Integrierte Bausteinsysteme Simatic» S. 34...37.