

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	77 (1986)
<b>Heft:</b>	23
<b>Artikel:</b>	Elektromagnetische Verträglichkeit bei SF6-gasisolierten Schaltungen
<b>Autor:</b>	Meppelink, J.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-904309">https://doi.org/10.5169/seals-904309</a>

### 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:** 26.01.2026

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

# **Elektromagnetische Verträglichkeit bei SF<sub>6</sub>-gasisolierten Schaltanlagen**

J. Meppelink

**Die Bedeutung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) bei metallgekapselten Schaltanlagen wächst mit der Einführung der modernen Mikroelektronik, die in der Anlage in Prozessnähe eingesetzt wird. In Prozessnähe wirken starke Störquellen, insbesondere die Schalthandlungen im Primärkreis. Die Elektronik ist empfindlich gegenüber den Wirkungen dieser Störquellen. Die Lösung besteht in einer systematischen EMV-Planung, mit der die Verträglichkeit der Elektronik mit ihrer Umwelt sichergestellt wird.**

**L'importance de la compatibilité électromagnétique de postes à blindage métallique croît avec l'introduction de la micro-électronique moderne, qui est utilisée dans l'installation près du processus. Ce sont avant tout les manœuvres de couplage dans le circuit primaire qui causent des perturbations auxquelles l'électronique est sensible. La solution consiste en une planification systématique, qui assure la compatibilité de l'électronique avec son environnement.**

Nach dem Vortrag des Autors an der ETH Zürich im Rahmen des Kolloquiums «Aktuelle Probleme der Energietechnik», am 28. Januar 1986. Erstveröffentlichung in «Brown Boveri Technik» Nr. 9/1986.

## **Adresse des Autors**

Dr. Ing. Jan Meppelink, Leiter der Grundlagenentwicklung Hochspannungstechnik und EMV-Prüftechnik im Geschäftsbereich Apparate und Anlagen der Stromverteilung, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, 5401 Baden.

## **1. Problemstellung**

In metallgekapselten SF<sub>6</sub>-gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen wird für die Steuerung und den Schutz Mikroelektronik in Prozessnähe eingesetzt, um eine hohe Gesamtverfügbarkeit der Energieversorgung zu erreichen. Die Vorteile dieser neuen Technik sind hohe Informationsdichte und Rechengeschwindigkeit, die eine Online-Überwachung der Anlage ermöglichen. Ein Nachteil ist die mit wachsender Komplexität der Elektronik steigende Störempfindlichkeit gegenüber der beständig wachsenden elektromagnetischen Umweltbelastung. Zur Gewährleistung einer hohen Zuverlässigkeit der Anlage ist daher die Anpassung der elektronischen Einrichtung an ihre elektromagnetische Umgebung erforderlich.

Die elektromagnetische Umgebung in einer metallgekapselten Hochspannungsschaltanlage ist durch die in Figur 1 schematisch dargestellten Störquellen bedingt. Es sind im wesentlichen Schalthandlungen mit Trennschaltern, Erdungsschaltern und Leistungsschaltern. Ungewollte Ereignisse, wie Blitzentladungen, Erd- und Kurzschlüsse, NEMP [1; 2], stellen ebenfalls eine Störquelle dar. Auch müssen in der Anlage eingesetzte Funkspiegelgeräte und benachbarte Leistungssender berücksichtigt werden. Alle diese Störquellen sind durch

die Störgrößen Störspannung, Störstrom, elektromagnetische Störfelder sowie Störenergie gekennzeichnet.

Gemäß Figur 2 werden die Störgrößen über einen Kopplungsweg an die Störsenke (elektronische Einrichtung oder Sekundärgerät) übertragen und dabei um den Kopplungsfaktor K abgeschwächt. Die typischen Kopplungswege sind Sekundärkabel, Spannungs- und Stromwandler, Erdungsanlagen sowie Feldeinkopplung in Schränke.

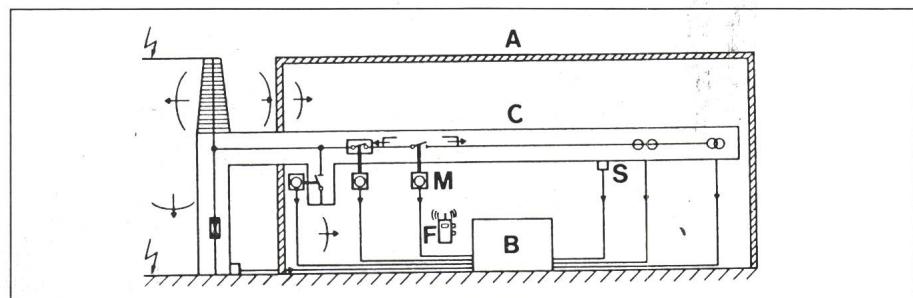
Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist erreicht, wenn die an der Störsenke wirksamen Störgrößen  $S_w$  kleiner sind als die Störfestigkeit F der Störsenke, d.h. die EMV-Bedingung

$$S_w < F \quad (1)$$

erfüllt ist. Auf dieser Basis erfolgt die Planung der EMV für eine Schaltanlage in drei Schritten:

- EMV-Analyse
- EMV-Massnahmen
- EMV-Nachweis

Mit einer EMV-Analyse werden die Störquellen identifiziert und deren Störgrößen bestimmt. Die Kopplungsfaktoren der Kopplungswägen werden berechnet oder messtechnisch ermittelt. Die Störfestigkeit der Sekundärgeräte ist im allgemeinen bekannt



**Fig. 1 Schematische Darstellung der Störquellen in metallgekapselten Hochspannungsschaltanlagen**

F: Funksprechgerät	M: Antriebsmotoren	S: Sensoren
A: Gebäude	B: Sekundäreinrichtung	C: Kapselung
Blitzentladungen, Wanderwellen, elektromagnetische Felder		

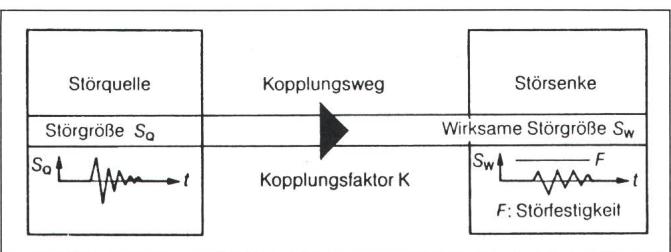


Fig. 2  
Wirkungsschema für die Einkopplung einer Störgröße, ausgehend von der Störquelle zur Störsenke

Figur 2 die frequenzabhängige Kopplungsimpedanz von Kabelschirm und Stecker. Figur 5 zeigt die Kopplungsimpedanz von Kabelschirmen und Steckern in Abhängigkeit von der Frequenz als Ergebnis einer mit speziell entwickelten Adapters zur Aufnahme von Kabelproben und Steckern durchgeführten Messungen.

Steuerkabel mit Geflechtschirm zeigen ab einer durch die Geometrie des Schirms bedingten Frequenz einen frequenzproportionalen Anstieg der Kopplungsimpedanz, der bei optimaler Geometrie zu höherer Frequenz verschoben werden kann. Aufgrund der mechanischen Herstellung des Geflechtes sind diese Kabel relativ teuer. Technisch und wirtschaftlich besser ist ein EMV-gehärtetes Kabel mit geschlossenem Kupferfolienschirm.

Stecker mit konventioneller Gummidichtung zeigen einen frequenzproportionalen Anstieg der Kopplungsimpedanz. Erst durch die Möglichkeit der Messung der Kopplungsimpedanz konnte ein Stecker mit minimaler Kopplungsimpedanz entwickelt wer-

[3], ansonsten wird sie durch Messung ermittelt. EMV-Massnahmen müssen ergriffen werden, wenn die genannte EMV-Bedingung Gl. (1) nicht erfüllt ist. Der EMV-Nachweis erfolgt bei Typenprüfungen als Abschluss von Entwicklungsversuchen, wo nötig bei Fabrikendprüfungen und bei der Inbetriebnahme.

## 2. EMV-Analyse

Die Störquellen sind in Figur 1 eingetragen. Angaben über die Höhe der Störgrößen findet man zum Teil in der Literatur [4; 5; 6]. Fehlende Werte müssen in Labor- und Netzversuchen mess-technisch ermittelt werden.

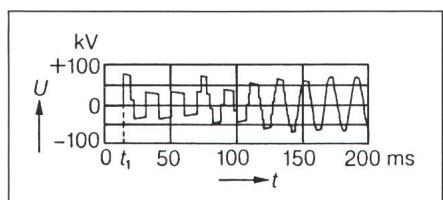


Fig. 3 Spannungsverlauf auf der Lastseite einer leerlaufenden Sammelschiene während einer Trennerschaltung

Ein Beispiel sind Messungen der transienten Überspannungen in einer metallgekapselten SF<sub>6</sub>-gasisolierten 110-kV-Schaltanlage der Stadtwerke München [7]. Figur 3 zeigt den Spannungsverlauf auf der Lastseite an einem Trennschalter. Die Spannungen wurden mit entsprechend schnellen Spannungsteilern und einem digitalen Messwerterfassungssystem aufgezeichnet. Während einer Trennung erfolgen etwa 100 Rückzündungen. Figur 4 zeigt die Vorgänge, die sich zum Zeitpunkt  $t_1$  in Figur 3 abspielen, mit grosser zeitlicher Auflösung. Innerhalb der metallgekapselten Anlage breiten sich vom Trennschalter Wanderwellen aus, die eine Störquelle darstellen. Die Einkopplung in die Sekundäreinrichtungen kann über Strom- und Spannungswandler, Antriebe der Trenner sowie Sensoren erfolgen.

An der Hochspannungsdurchführung (Fig. 1) verlassen die Wanderwellen die koaxiale Leiteranordnung und teilen sich auf die Hochspannungsfreileitung und die durch Kapselung und Erdungsanlage gebildete Anordnung auf [8]. Dabei tritt eine transiente Erhöhung des Kapselungspotentials auf, die als Störquelle wirkt. Die Einkopplung in Sekundäreinrichtungen erfolgt über Erdungsanlage, Steuerkabel, Sensoren und Feldeinkopplung in Schränke.

Die Stromeinkopplung in die Erdungsanlage bewirkt dort unterschiedliche Potentiale und Stromeinkopplung in die Schirme von Steuerkabeln. Der Störstrom auf dem Schirm eines Steuerkabels, das zumeist mit Hilfe geeigneter Stecker an die Geräte angeschlossen wird, zeigt einen komplexen Zeitverlauf mit Frequenzteilen bis zu einigen 10 MHz. Über die Kopplungsimpedanz von Kabelschirm und Stecker wird zwischen den Kabeladern eine Störspannung wirksam. Der Kopplungsfaktor ist hier im Sinne von

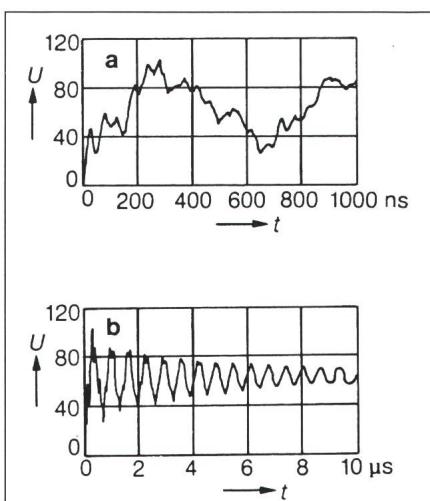


Fig. 4 Spannungsverlauf in Figur 3 zur Zeit  $t_1$  bei hoher Zeitauflösung

- Bereich 0-1 µs: Steiler Spannungsanstieg binnen 4-7 ns mit anschliessenden Reflexionsvorgängen
- Bereich 0-10 µs: Übergang der Wanderwellen in eine monofrequeute Schwingung von einigen MHz

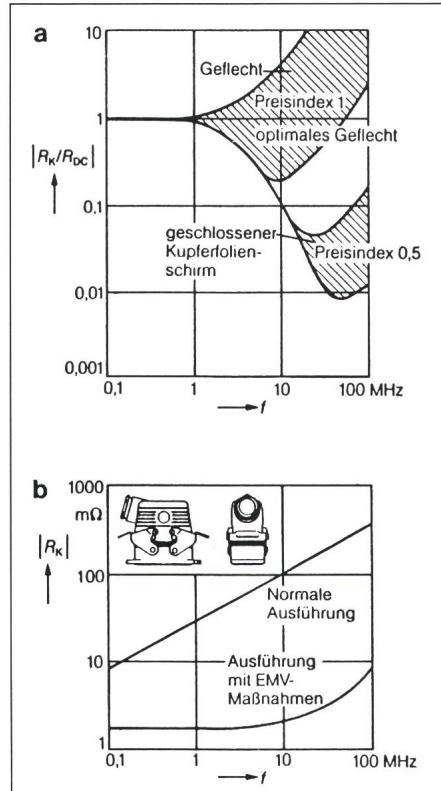


Fig. 5 Kopplungsimpedanzen von Steuerkabelschirmen (a) und mehrpoligen Steckern (b) in Abhängigkeit von der Frequenz

- Steuerkabelschirme:  
 $R_{DC}$ : Gleichstromwiderstand  
 $R_K$ : Kopplungsimpedanz
- mehrpolige Stecker:  
 $R_K$ : Kopplungsimpedanz

den. Nur die Kombination eines EMV-gehärteten Sekundärkabels mit einem EMV-gehärteten Stecker ist sinnvoll, da beide Kopplungsimpedanzen in Reihe geschaltet sind. Für Sekundär-Kabelstrecken in einer metallgekapselten 800-kV-Schaltanlage werden derzeit die neu entwickelten EMV-gehärteten Stecker und Kabel eingesetzt.

Die Kopplung über Strom- und Spannungswandler wird im Hochspannungslabor während Trenner-schaltungen mit den vorhandenen breitbandigen Messwerterfassungssystemen (Bandbreiten bis zu 500 MHz) durch Messung bestimmt. Bei Trennerschaltungen mit der Systemspannung von 800 kV wurde an Sekundärklemmen von Spannungswandlern eine Maximalspannung von 900 V und an Stromwandlern von 1200 V ermittelt. Die Antriebe von Schaltern produzieren während der Abschaltung von Relais- bzw. Schützenspulen ihrerseits Überspannungen auf Sekundärleitungen.

Die Feldeinkopplung von elektromagnetischen Wellen in Schränke erfolgt über den freien Raum durch Türschlitze, Öffnungen von Bedienungs- und Anzeigeelementen und Lüftungsöffnungen. Der Kopplungsfaktor ist die Schirmdämpfung eines Schrankes und kann rechnerisch [9] oder mess-technisch bestimmt werden.

Die Störfestigkeit der Störsenke, d.h. eines Sekundärgerätes, wird von den Herstellern angegeben. Diese den Wert  $F$  in Figur 2 darstellende Grösse wird entsprechend IEC 255-4 mit einem Hochfrequenztest bei 2,5 kV Scheitelwert ermittelt, wobei keine Fehlfunktion auftreten darf [3].

Aufgrund einer sorgfältigen EMV-Analyse im Sinne von Figur 2 kann festgestellt werden, ob Gl. (1) erfüllt ist. Wenn keine EMV vorliegt, d.h. Gl. (1) nicht erfüllt ist, müssen EMV-Massnahmen ergriffen werden.

### 3. EMV-Massnahmen

EMV-Massnahmen können an der Störquelle, am Kopplungsweg oder an der Störsenke (Sekundärgerät) getroffen werden.

#### Massnahmen an Störquellen

Massnahmen an den Störquellen sind in Schaltanlagen schwer realisierbar, da sie meist zusätzliche Einrich-tungen notwendig machen, die wieder-

**Fig. 6**  
Einführung eines  
800-kV-Kapselungs-  
rohres in ein Gebäude



um die Zuverlässigkeit der Anlage reduzieren können. Beispielsweise kann die transiente Erhöhung des Kapselungspotentials dadurch vermindert werden, dass die Hochspannungs-durchführung nahe dem Erdboden angeordnet und mit einer niederimpedanten Verbindung geerdet wird.

Figur 6 zeigt die Einführung eines Kapselungsrohres für eine 800-kV-Schaltanlage in ein Gebäude. Mit Hilfe einer metallischen Manschette wird rundum eine Verbindung zwischen Kapselung und einer Metallplatte am Gebäude hergestellt. Die Metallplatte ist mit dem Baustahl verbunden. Eine Kupferschiene ausreichenden Querschnitts sorgt für die Übernahme von niederfrequenten Strömen, z.B. im Erdkurzschlussfall.

Auch bei der Anordnung der Be-triebsmittel und der Gebäudekonstruktion sollten EMV-Aspekte beachtet werden.

#### Massnahmen an Kopplungswegen

An den Kopplungswegen können folgende Massnahmen getroffen werden:

- vermaschte Erdungsanlage
- Verwendung von Steuerkabeln und Steckern mit geringer Kopplungs-impedanz
- Beidseitige Erdung von Kabelschir-men
- Sekundärkreise von Wandlern nur einmal erden
- koaxiale Einführung von Sekundär-Kabelschirmen in Schränke
- Filterung der Netzversorgung
- Begrenzung von transienten Über-spannungen mit MO-Ableitern
- Einsatz von Lichtwellenleiter zur Informationsübertragung.

#### Massnahmen an Sekundärgeräten

Folgende Massnahmen an Sekun-därgeräten, die innerhalb eines Schrankes angeordnet sind, erscheinen zweckmässig:

- Räumliche Anordnung nach einem Zonenkonzept. Jede Zone weist dann eine definierte wirksame Stör-grösse auf.
- Einsatz von kopplungsarmen Interface für den Rechneranschluss:
  - Trennwandler für Strom- und Spannungswandersignale
  - Relais
  - Optokoppler
  - Filter
  - Lichtwellenleiter
- Verkabelung zwischen Interface streng nach Eingang und Ausgang getrennt.

### 4. EMV-Nachweis

Der EMV-Nachweis erfolgt in allen Phasen der Planung und Entstehung einer Schaltanlage und dient als Bestä-tigung der EMV-Bedingung Gl. (1). In vielen Fällen kann diese Bestätigung durch den Einsatz von Rechenpro-grammen erbracht werden. Wo die Rechnung nicht zum Ziel führt, wird der EMV-Nachweis experimentell durch Typenprüfung als Abschluss von Entwicklungsversuchen erbracht.

Bei der Fabrikation werden die auf-grund der EMV-Analyse getroffenen EMV-Massnahmen realisiert. In Ab-hängigkeit vom Umfang und der Be-deutung der getroffenen Massnahmen erfolgt eine Fabrikendprüfung vor der Auslieferung.

Für diese Prüfungen wurde ein EMV-Labor mit den notwendigen

Prüfeinrichtungen aufgebaut. Ein Beispiel von vielen durchgeföhrten Prüfungen im EMV-Labor ist die Messung der Einkopplung von transienten Störspannungen auf die Sekundärseite von Trennwandlern, die als Interface für den Anschluss der Strom- und Spannungswandler an einen prozessnahen Rechner dienen. Dabei ist die Wirkung der getroffenen EMV-Massnahmen voll bestätigt worden. Der EMV-Nachweis der ganzen Schaltanlage erfordert alle prozessbedingten Störquellen und wird bei der Inbetriebnahme vor Ort erbracht.

Im Falle der Lieferung einer 800-kV-SF<sub>6</sub>-Schaltanlage hat BBC über die Prüfung an Einzelkomponenten hinaus EMV-Messungen an einer Pilotanlage durchgeföhr. Es werden ausser den Testprogrammen der Funktion auch Messungen der Störgrößen und Kopplungsfaktoren durchgeföhr. In dieser Schaltanlage wird prozessnahe Mikroelektronik in besonders abgeschirmten Schränken eingesetzt. Speziell für die Messung der elektromagnetischen Felder stehen Feldsonden für die erdgebundene und die potentialunabhängige Messung zur Verfügung [10].

## 5. EMV-Normen

Von der Vielzahl derzeit gültiger EMV-Normen ist keine volumänglich auf die Belange der Sekundäreinrichtungen in Hochspannungsschaltanlagen anwendbar. Für einzelne Komponenten, wie z.B. Relais, sind zum Teil Normen vorhanden. Es sind jedoch keine Grenzwerte für Störgrößen in Schaltanlagen vorgeschrieben. Daher muss ein Schaltanlagenhersteller diese Grenzwerte selbst ermitteln und die von ihm eingesetzten Sekundärgeräte auf diese Grenzwerte prüfen, so dass schliesslich auch ohne Vorschrift die Zuverlässigkeit der Schaltanlage sichergestellt ist.

## 6. Ausblick

Mit der hier vorgestellten konsequenten EMV-Planung für eine Schaltanlage ist der EMV-Komplex technisch überschaubar. Dadurch ist es möglich, die Vorteile des Einsatzes von Mikroelektronik in Schaltanlagen voll zu nutzen, da mit der EMV-Planung die Verträglichkeit störempfindlicher Mikroelektronik mit der elektro-

magnetischen Umgebung einer SF<sub>6</sub>-Schaltanlage gewährleistet ist.

## Literatur

- [1] O. Horak: Der elektromagnetische Puls (EMP) als Gefahr für die Welt der Elektrotechnik. E und M 101(1984)7, S. 321...332.
- [2] H. Ungrad und E. Wildhaber: Massnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit von Schutzeinrichtungen. Brown Boveri Mitt. 65(1978)6, S. 348...357.
- [3] O. Haug: Messung von transienten Überspannungen auf den Sekundärleitungen einer 220-kV-SF<sub>6</sub>-Schaltanlage. ETZ-A 97(1976)1, S. 22.
- [4] H. Neuhaus und F. Pigler: Blitzkennwerte als Grundlage der Bemessung von Blitzschutzmassnahmen. ETZ 103(1982)9, S. 463...467.
- [5] A. Strnad et C. Reynaud: Orientation de la construction des postes HT en vue de la réduction des perturbations électromagnétiques dans le système secondaire. Electra (1985)100, p. 87...107.
- [6] D. König, G. Imgrund und J. Grandl: Ausgleichsvorgänge beim Schalten von Trenner-schaltern in SF<sub>6</sub>-isolierten metallgekapselten Hochspannungsschaltanlagen vor Ort. Fifth International Symposium on Switching Arc Phenomena, 24...26 September 1985, Lodz/Poland.
- [7] E. P. Dick a.o.: Transient ground potential rise in gas-insulated substations. Problem identification and mitigation. IEEE Trans PAS 101(1982) 10, p. 3610...3619.
- [8] K. Feser und W. Pfaff: Feldstärkemessung beliebiger dreidimensionaler elektrischer Felder mit einer kapazitiv beschalteten Kugelfeldsonde. 18. Internationale Blitzschutzkonferenz, München, 1985; Bericht Nr. 1.12, S. 79...85.