

# Messergebnisse über die Kurvenform von Netzspannung und Strom im schweizerischen Hochspannungs-Verbundnetz

Autor(en): **Angst, M. / Tschappu, F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **58 (1967)**

Heft 9

PDF erstellt am: **14.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916247>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)  
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

## Messergebnisse über die Kurvenform von Netzspannung und Strom im schweizerischen Hochspannungs-Verbundnetz

Von M. Angst und F. Tschappu, Zug

621.311.161 : 621.3.014 : 621.3.015

*Um die durch die Oberwellen verursachte Messunsicherheit der Elektrizitätszähler der höchsten Genauigkeitsklasse im Netz abschätzen zu können, wurden an einigen wichtigen Meßstellen der verschiedenen Verteilzentren im schweiz. 220- und 150-kV-Hochspannungs-Verbundnetz Oberwellenmessungen in Netzspannung und Strom durchgeführt.*

*Zwischen dem relativen Oberwellengehalt in der Netzspannung und der Grösse der übertragenen Leistung besteht kein eindeutiger Zusammenhang. Der mittlere Klirrfaktor in der Netzspannung beträgt 0,92 %.*

*Der relative Oberwellengehalt im Strom ist mit guter Näherung umgekehrt proportional zur übertragenen Leistung. Bei einer relativen Belastung von 40 % und mehr, bezogen auf die vertraglich festgelegte maximal zu übertragende Leistung  $P_{\max}$ , beträgt der Klirrfaktor im Strom 1 % und weniger.*

*Afin de pouvoir évaluer l'insécurité des mesures occasionnée aux compteurs électriques du degré de précision le plus élevé par des ondes harmoniques, des mesures d'harmoniques à la tension du réseau et au courant furent exécutées à quelques points de mesure essentiels des divers centres de distribution du réseau suisse d'interconnexion à haute tension de 220 et 150 kV.*

*Entre le taux relatif d'harmoniques à la tension du réseau et la grandeur de la puissance à transmettre il n'existe pas de relation déterminée. Le facteur de distorsion moyen de la tension du réseau atteint 0,92 %.*

*D'après une bonne approximation, le taux relatif d'harmoniques du courant est inversement proportionnel à la puissance transmise. Pour une charge relative de 40 % et davantage, rapportée à la puissance maxima à transmettre  $P_{\max}$ , stipulée par contrat, le facteur de distorsion du courant atteint 1 % et moins.*

### 1. Aufgabenstellung und Messprogramm

Die Beurteilung der Messgenauigkeit der Elektrizitätszähler im Netzbetrieb setzt die Kenntnis der verschiedenen Einflussfaktoren voraus. Bei bekannter statistischer Verteilung der Belastung im Netz können die lastabhängigen Zusatzfehler der Messinstrumente ermittelt werden.

Das Bedürfnis nach grösserer Genauigkeit in der Messung von grossen Energiemengen, das in der Schaffung von internationalen Empfehlungen der CEI (Commission Electrotechnique Internationale) für die Elektrizitätszähler der Klasse 0,5 zum Ausdruck kommt, hat nun die Diskussion über Sinn und Zweck von Normen für die Elektrizitätszähler der höchsten Genauigkeitsklasse auf ein Gebiet geführt, das bis heute noch wenig erforscht ist, und über das in der Literatur sehr wenig zu finden ist. Es sind dies die Einflüsse der Spannungs- und Strom-Oberwellen auf die Messgenauigkeit der Elektrizitätszähler.

Man weiss heute wohl, dass bei den Elektrizitätszählern für Haushalt und Gewerbe, die nach den internationalen Empfehlungen der CEI der Zählerklasse 2 zugeordnet sind, die durch Oberwellen in Spannung und Strom verursachten Zusatzfehler gegenüber den Einflüssen von Belastung, Spannung, Temperatur usw. im Netz praktisch vernachlässigt werden können. Die Verhältnisse sind aber bei den Elektrizitätszählern der höchsten Genauigkeitsklasse, die zur Hauptsache zur Messung von grossen Energiemengen im Hoch- und Mittelspannungsnetz verwendet werden, anders, da bei dieser Hochpräzisions-Zählerklasse die verschiedenen Zusatzfehler viel enger toleriert werden. Dies bedingt besondere Massnahmen sowohl im Aufbau als auch in der Fertigung der Apparate. Die einzelnen Zählerelemente müssen sorgfältig geprüft und aufeinander

abgestimmt werden. Ferner benötigt die Eichung dieser Apparate besondere Sorgfalt und Betreuung.

Wird nun ein Elektrizitätszähler bei sinusförmigen Spannungen und Strömen geeicht, so zeigt der Apparat im Netzbetrieb Zusatzfehler an, wenn Netzspannung und/oder -Strom von der Sinusform abweichende Kurvenform aufweisen, d.h. wenn neben der Grundwelle auch Oberwellen verschiedenster Ordnungszahlen vorhanden sind. Die Grösse dieser Zusatzfehler hängt ab vom Aufbau der Messapparate sowie vom relativen Anteil der Spannungs- und Strom-Oberwellen und ihrer Ordnungszahl.

Bei gegebenem Aufbau der Messapparate gibt allein die statistische Verteilung der Spannungs- und Strom-Oberwellen ein zuverlässiges Bild über die praktisch realisierbare Messgenauigkeit der im Netz eingesetzten Zähler.

Um hierüber ausreichende Unterlagen zu schaffen, wurden kürzlich von einer Messequipe der Landis & Gyr AG, Zug, ausgedehnte Oberwellenmessungen an den wichtigsten Einsatzpunkten der Hochpräzisionszähler, welche die Bedingungen der CEI-Empfehlung (Entwurf) für die Zähler der Genauigkeitsklasse 0,5 einhalten, im schweizerischen Hochspannungs-Verbundnetz durchgeführt. Dank dem Entgegenkommen aller angefragten Elektrizitätsgesellschaften war man in der Lage, die Kurvenform von Netzspannung und -Strom an verschiedenen Messpunkten während längerer Zeit zu ermitteln, so dass die statistische Auswertung der ausgedehnten Messreihen eine gute Basis zur Ermittlung der Messgenauigkeit der Hochpräzisionszähler im Netzbetrieb bildet. Neben der Kenntnis der Kurvenform im schweizerischen Hochspannungs-Verbundnetz interessierten besonders die Grösse und Ordnungszahl der Oberwellen in den Transferleitungen nach Deutschland und

Tabelle I

Nr.	Ort	Untersuchte Leitung	Verkettete Netzspannung $U$ kV	Maximale Belastung $P_{max}$ MW	Graphische Darstellung der Oberwellen
1	Mettlen	Gotthard – Airolo – Lavorgo	220	200	Fig. 2
2	Mettlen	Rathausen	150	100	Fig. 3
3	Laufenburg	Alb – Nord, Gurtweil nach BW	220	300	Fig. 4
4	Laufenburg	Alb – Süd, Tiengen nach RWE	220	300	Fig. 4
5	Laufenburg	Eggberg nach EdF	220	400	Fig. 5
6	Laufenburg	Kembs nach EdF	220	300	Fig. 6
7	Laufenburg	Ryburg – Schwörstadt	150	100	Fig. 6
8	Laufenburg	Mühleberg nach BKW	220	300	Fig. 7
9	Laufenburg	Bickigen nach BKW	220	300	Fig. 7
10	Mühleberg	Sanetsch 1 – Chamoson nach EOS	220	200	Fig. 8
11	Mühleberg	Sanetsch 2 – Chamoson nach EOS	220	200	Fig. 9
12	Mühleberg	Hauterive	220	200	Fig. 10
13	Mühleberg	Bickigen nach BKW	220	200	Fig. 10
14	Mühleberg	Pieterlen	150	150	Fig. 11
15	Mühleberg	Wimmis 2	150	150	Fig. 11

Bezeichnungen:  
 BW Badenwerk AG, Karlsruhe  
 RWE Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG, Essen  
 EdF Electricité de France  
 BKW Bernische Kraftwerke  
 EOS Energie Ouest Suisse

Frankreich. Diese Verhältnisse wurden in der 220-kV-Schaltanlage der Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg, wo drei Netze sternförmig zusammengeschaltet sind, eingehend untersucht.

Ausserdem interessierte auch die Kurvenform der grossen schweizerischen Nord-Süd-Transitleitungen Laufenburg-Mühleberg-Sanetsch-Wallis sowie der Gotthard-Leitung Mettlen-Airolo-Lavorgo.

In Tabelle I sind die an den verschiedenen Meßstellen untersuchten Hochspannungsleitungen samt ihren technischen Daten zusammengestellt. Über die geographische Lage der Meßstellen und der untersuchten Leitungen orientiert Fig. 1. Es handelt sich hier ausnahmslos um Drehstrom-Dreileiternetze für 220 bzw. 150 kV.

An sämtlichen Meßstellen, an denen Oberwellenmessungen durchgeführt wurden, sind Drehstrom-Dreileiternetze-Präzisionszähler eingesetzt. Spannungsseitig wurde auf der Sekundär-

seite der Meßwandler, parallel zur Spannungsspule ein Zähler angekoppelt und der Oberwellengehalt der Phasenspannung im Netz ermittelt.

Da alle Zähler der untersuchten Meßstellen stromseitig mit Messklemmen ausgerüstet sind, konnte der Oberwellengehalt des Stromes am Spannungsabfall eines in Serie zur Stromspule geschalteten Ohmschen Widerstandes ermittelt werden.

2. Messresultate

Insgesamt wurden an 15 verschiedenen Meßstellen mehr als 600 Einzelmessungen vorgenommen. Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, die Oberwellen nicht nur kurzzeitig, sondern während mehrerer Stunden laufend zu messen, um gegebenenfalls einen Zusammenhang mit der Grösse der relativen Leitungsbelastung zu finden.

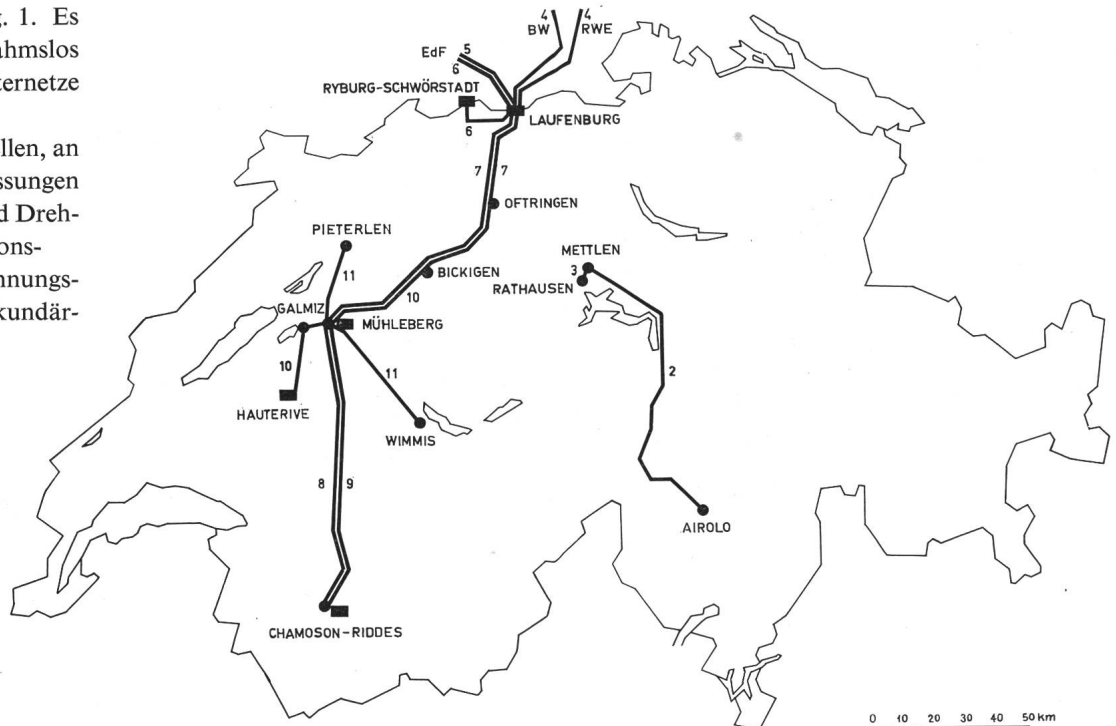
In den Fig. 2...11 ist der zeitliche Verlauf der Spannungs- und Strom-Oberwellen gesondert nach Ordnungszahl sowie die relative Belastung  $P/P_{max}$  der untersuchten Leitungen graphisch aufgetragen. Die Grösse  $P_{max}$  bezieht sich auf den mit dem Partner vertraglich vereinbarten Höchstwert der zu übertragenden Belastung. Mit  $P$  ist dagegen die momentan übertragene Leistung bezeichnet.

In Tabelle II sind Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der relativen und absoluten Leitungsbelastung sowie der Spannungs- und Strom-Oberwellen der Ordnungszahlen 3, 5 und 7 in % der Grundwelle zahlenmässig zusammengestellt. Die Angaben in Tabelle II über den mittleren Oberwellengehalt der Netzspannung der 15 untersuchten Leitungen dienen als Basis für die in Fig. 12 dargestellte Summenhäufigkeit der Oberwellen.

Bei der Ermittlung der statistischen Verteilung der Strom-Oberwellen wurde von der Überlegung ausgegangen, dass für eine wirtschaftliche Abschätzung der durch die Oberwellen verursachten Messungenauigkeit der verwendeten Präzisionszähler nicht die relativen Oberwellenanteile in % der Grundwelle, sondern die absoluten Oberwellenströme, welche bei gegebenem prozentualen Oberwellengehalt ungefähr pro-

Fig. 1 Geographische Lage der Meßstellen und der untersuchten Hochspannungsleitungen

Die Zahlen geben die Nummer der Figur an, in welcher die entsprechenden Messergebnisse zu finden sind  
 ■ Kraftwerk;  
 ● Unterwerk



Meßstelle		Leitung nach	Spannung $U$ der Leitung Max. Belastung $P_{max}$ der Leitung		Belastung der Leitung $P/P_{max}$ in %			Mittelwert der übertragene Leistung $P$	3. Oberwelle						5. Oberwelle						7. Oberwelle								
									Spannung in % der Grundwelle			Strom in % der Grundwelle			Spannung in % der Grundwelle			Strom in % der Grundwelle			Spannung in % der Grundwelle			Strom in % der Grundwelle					
Nr.	Ort		kV	MW	min	max	med	MW	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med	min	max	med
1	Mettlen	Gotthard-Airola	220	200	16	47	33	66	0,3	0,4	0,35	0,2	1,2	0,35	0,8	0,9	0,85	0,15	0,8	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2			
2	Mettlen	Rathausen	150	100	31	36	33	33	0,5	0,6	0,55	0,2	0,3	0,25	0,7	0,9	0,8	0,8	1,1	0,9	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,3			
3	Laufenburg	Alb-Nord BW	220	300	2	33	17	51	0,8	0,9	0,85	0,4	4,0	1,6	1,1	1,6	1,5	0,8	5,0	1,9	0,1	0,2	0,15	0,2	2,0	0,7			
4	Laufenburg	Alb-Süd RWE	220	300	7	18	10	30	0,4	1,8	0,7	1,3	2,4	2,0	1,0	1,3	1,2	0,7	1,5	1,0	0,1	0,1	0,1	0,5	1,4	0,8			
5	Laufenburg	Eggberg EdF	220	400	8	25	18	72	0,3	0,4	0,35	1,0	2,5	1,3	0,5	1,0	0,75	0,4	1,0	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,4			
6	Laufenburg	Kembs EdF	220	300	13	24	17	51	0,3	0,4	0,3	1,5	2,4	2,0	0,8	0,9	0,85	0,9	1,5	1,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,4			
7	Laufenburg	Ryburg-Schwörstadt	150	100	10	10	10	10	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	0,2	0,9	1,2	1,0	0,6	1,0	0,8	0,2	0,5	0,4	0,3	0,4	0,35			
8	Laufenburg	Mühleberg BKW	220	300	20	26	24	72	0,4	0,4	0,4	0,2	0,3	0,25	0,8	0,9	0,85	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4	0,35			
9	Laufenburg	Bickigen BKW	220	300	10	15	13	39	0,4	0,4	0,4	0,4	1,2	0,7	0,6	0,9	0,8	1,0	4,5	2,2	0,1	0,2	0,15	0,3	1,0	0,5			
10	Mühleberg	Sanetsch 1 EOS	220	200	17	25	20	40	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	0,55	0,4	0,8	0,6	1,6	1,9	1,7	0,1	0,2	0,15	0,1	0,4	0,25			
11	Mühleberg	Sanetsch 2 EOS	220	200	9	48	23	46	0,3	0,4	0,35	0,2	1,3	0,6	0,5	0,8	0,65	0,4	5,2	1,7	0,15	0,35	0,25	0,2	2,3	0,65			
12	Mühleberg	Hauterive	220	200	4	8	5	10	0,9	0,9	0,9	1,5	2,0	1,7	0,3	0,7	0,5	11	13	12	0,1	0,2	0,15	1,5	5	3,3			
13	Mühleberg	Bickigen BKW	220	200	5	13	8	16	0,2	0,2	0,2	1,2	2,6	1,9	0,4	0,6	0,5	6	16	11,7	0,3	0,4	0,35	1,8	5	3,5			
14	Mühleberg	Pieterlen	150	150	26	36	31	46	0,1	0,2	0,15	0,3	1,1	0,7	0,5	0,9	0,7	0,5	1,3	0,9	0,2	0,3	0,25	0,1	0,1	0,1			
15	Mühleberg	Wimmis 2	150	150	27	27	27	40	0,1	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,7	0,5	0,3	0,4	0,35	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2			

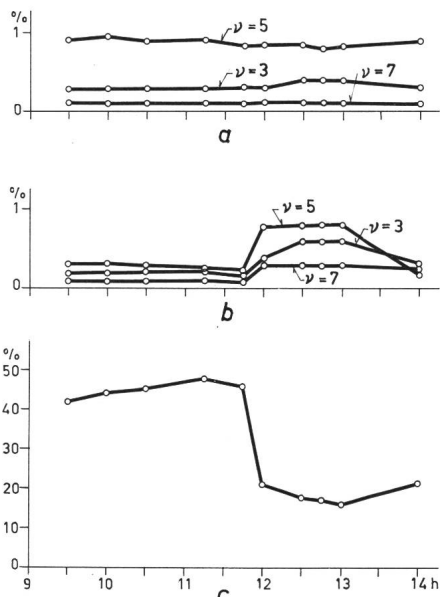


Fig. 2

Messwerte der Meßstelle Nr. 1 in Mettlen

Leitung: Lavorgo - Gotthard - Mettlen, 220 kV/200 MW

a Oberwellengehalt der Netzspannung; b Oberwellengehalt des Netzstromes; c relative Belastung der Leitung  $P/P_{max}$

$\nu$  Ordnungszahl der Oberwellen

Datum der Messungen: 13. April 1966

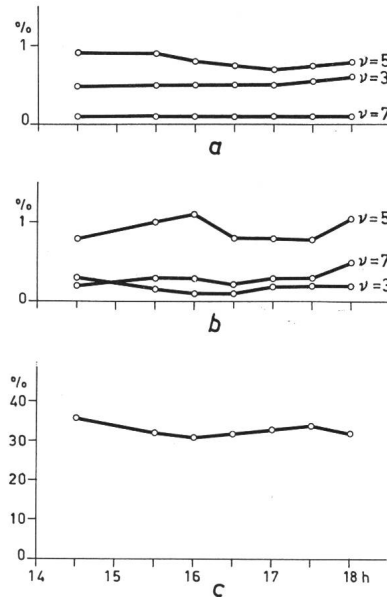


Fig. 3

Messwerte der Meßstelle Nr. 2 in Mettlen

Leitung: Mettlen - Rathausen, 150 kV/100 MW

Datum der Messungen: 13. April 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

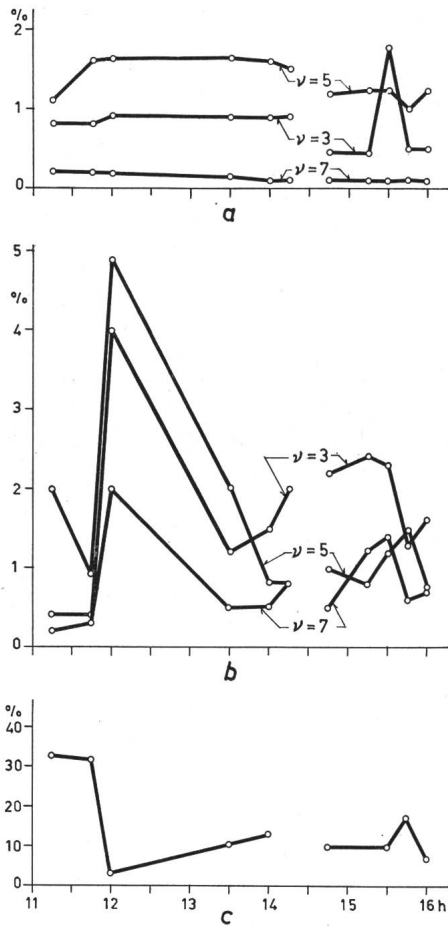


Fig. 4

Messwerte der Meßstellen Nr. 3 (links) und Nr. 4 (rechts) in Laufenburg  
Leitungen:

Laufenburg - Alb Nord, Gurtweil nach BW, 220 kV/300 MW (links) und  
Laufenburg - Alb Süd, Tiengen nach RWE, 220 kV/300 MW (rechts)

Datum der Messungen: 20. April 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

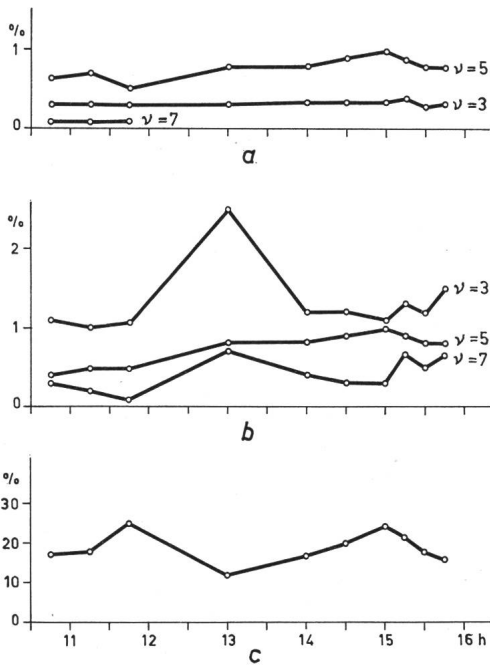


Fig. 5

Messwerte der Meßstelle Nr. 5 in Laufenburg

Leitung: Laufenburg - Eggberg nach EdF, 200 kV/400 MW

Datum der Messungen: 19. April 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

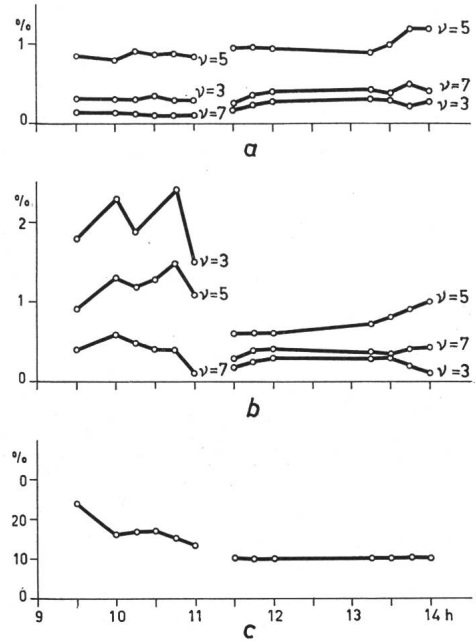


Fig. 6

Messwerte der Meßstellen Nr. 6 (links) und Nr. 7 (rechts) in Laufenburg

Leitungen:

Laufenburg - Kembs nach EdF, 220 kV/300 MW (links) und  
Laufenburg - Ryburg-Schwörstadt, 150 kV/100 MW (rechts)

Datum der Messungen: 21. April 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

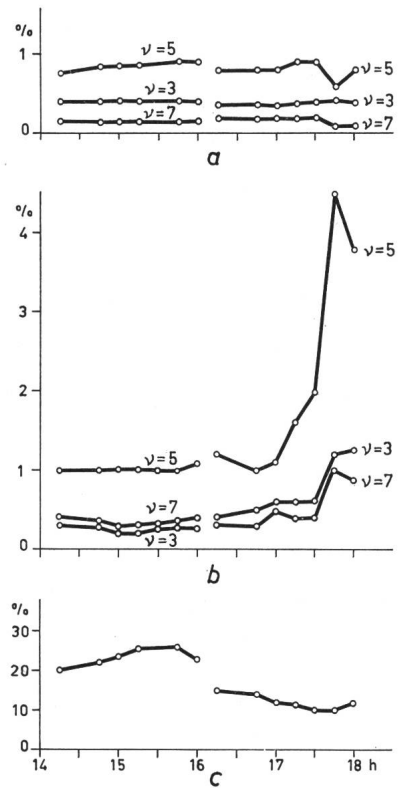


Fig. 7

Messwerte der Meßstellen Nr. 8 (links) und Nr. 9 (rechts) in Laufenburg

Leitungen:

Laufenburg - Mühleberg nach BKW, 200 kV/300 MW (links) und  
Laufenburg - Bickigen nach BKW, 220 kV/300 MW (rechts)

Datum der Messungen: 21. April 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

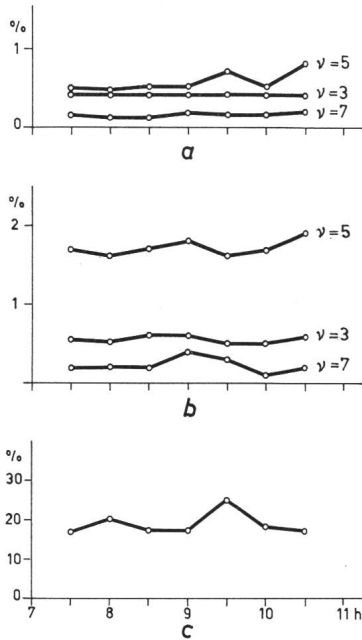


Fig. 8

**Messwerte der Meßstelle Nr. 10 in Mühleberg**

Leitung: Mühleberg-Sanetsch 1 - Chamoson-Riddes nach EOS, 220 kV/200 MW

Datum der Messungen: 3. Mai 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

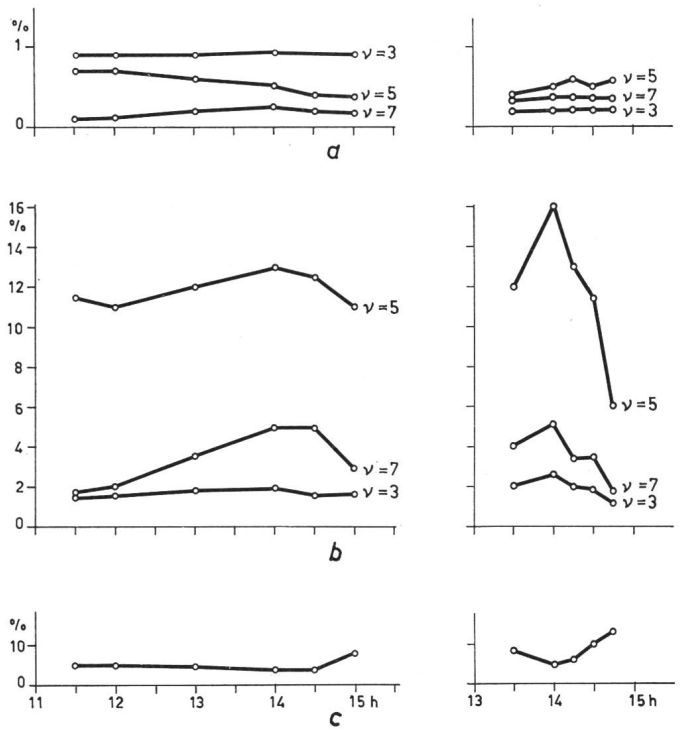


Fig. 10

**Messwerte der Meßstellen Nr. 12 (links) und Nr. 13 (rechts) in Mühleberg**

Leitungen:

Mühleberg - Hauterive nach EOS, 220 kV/200 MW (links) und

Mühleberg - Bickigen nach BKW, 220 kV/200 MW (rechts)

Datum der Messungen: 2. und 3. Mai 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

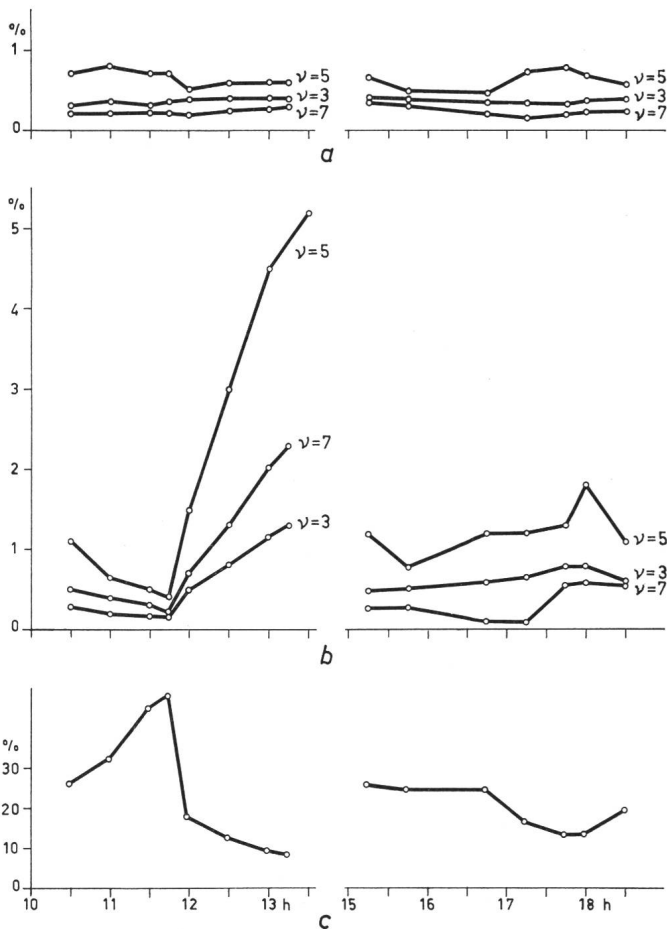


Fig. 9

**Messwerte der Meßstelle Nr. 11 in Mühleberg**

Leitung: Mühleberg-Sanetsch 2 - Chamoson-Riddes nach EOS, 220 kV/200 MW

Datum der Messungen: 2. Mai 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

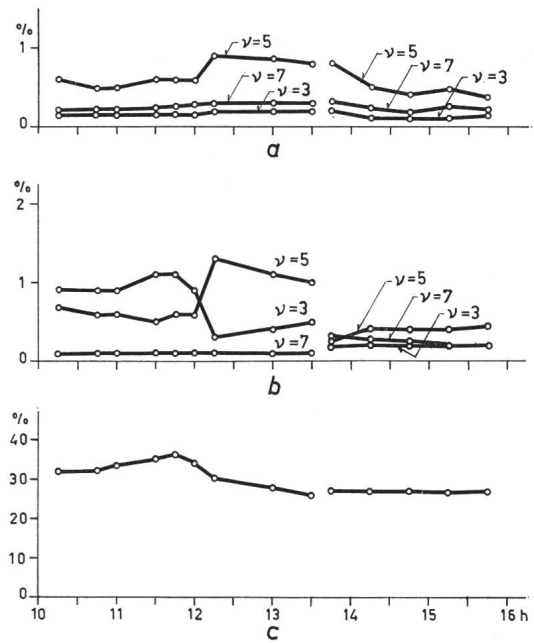


Fig. 11

**Messwerte der Meßstellen Nr. 14 (links) und Nr. 15 (rechts) in Mühleberg**

Leitungen: Mühleberg - Pieterlen, 150 kV/150 MW (links) und

Mühleberg - Wimmis 2, 150 kV/150 MW (rechts)

Datum der Messungen: 4. Mai 1966

Bezeichnungen siehe Fig. 2 und Tab. I

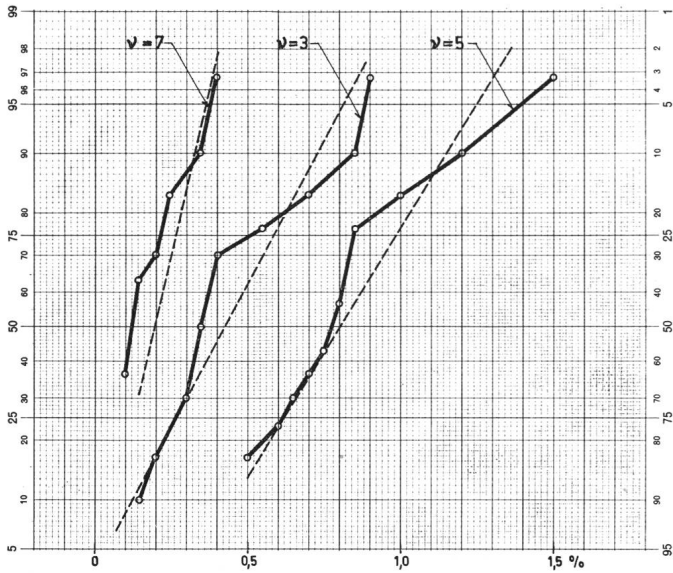


Fig. 12  
Oberwellengehalt der Netzspannung in % der Grundwelle  
Summenhäufigkeit  
 $\nu$  Ordnungszahl der Oberwellen

portional der übertragenen Leistung sind, zugrunde gelegt werden müssen.

Der mittlere Oberwellenstrom der einzelnen Leitungen wurde aus dem relativen Oberwellengehalt nach Gl. (1) rechnerisch ermittelt und damit die in Fig. 13 dargestellte Summenhäufigkeit der Stromoberwellen berechnet:

$$I'_{\nu i} \approx \sum_1^{15} \left( \frac{I_{\nu i}}{I_{i1}} \right) \left( \frac{P_{i \text{ med}}}{\sum_1^{15} P_{i \text{ med}}} \right) \quad (1)$$

worin:

- $\nu$  Ordnungszahl der Stromoberwelle
- $I_{\nu i}/I_{i1}$  relativer Oberwellengehalt im Laststrom der  $i$ -ten Leitung
- $P_{i \text{ med}}$  mittlere Leistung der  $i$ -ten Leitung
- $\sum P_{i \text{ med}}$  Summe der mittleren Leistungen aller untersuchten 15 Leitungen

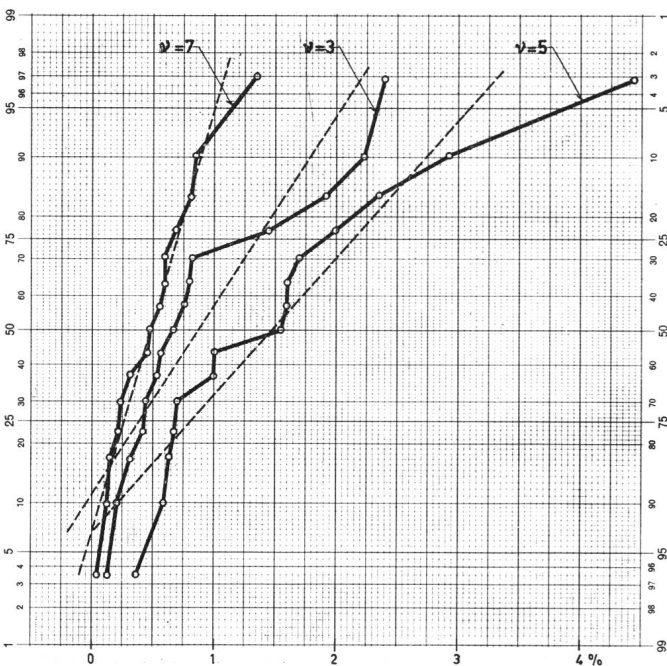


Fig. 13  
Oberwellengehalt des Stromes in % der Grundwelle  
Summenhäufigkeit  
Bezeichnung siehe Fig. 12

In Fig. 14 ist der Zusammenhang zwischen dem Klirrfaktor im Strom  $k_i$  und der relativen Leitungsbelastung  $P/P_{\text{max}}$  graphisch dargestellt. Zu diesem Zweck wurden pro Leitung bzw. Meßstelle die prozentualen Stromoberwellen z.Z. der kleinsten und grössten Netzbelastung mit Hilfe der in Fig. 14 aufgeführten Gleichung umgerechnet.

### 3. Auswertung der Messresultate und Schlussfolgerungen

Im allgemeinen ist der prozentuale Oberwellengehalt in der Netzspannung kleiner als im Strom und praktisch unabhängig von der Grösse der übertragenen Leistung. Der mittlere Klirrfaktor in der Netzspannung, ermittelt aus den mittleren relativen Oberwellen der Ordnungszahlen 3, 5 und 7 aller 15 untersuchten Leitungen gemäss Tabelle II beträgt:

$$k_u = 0,92 \%$$

Es besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Anteil der Oberwellen in Netzspannung und Strom. In der Leitung Nr. 13 Mühleberg-Bickigen wurde am 3. Mai 1966 um 14.00 Uhr bei einer relativen Leitungsbelastung  $P/P_{\text{max}}$  von

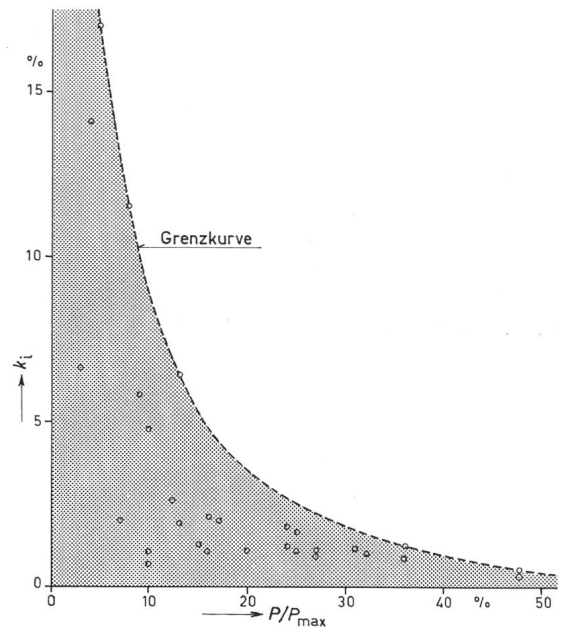


Fig. 14  
Zusammenhang zwischen dem Klirrfaktor im Strom  $k_i$  und der relativen Belastung  $P/P_{\text{max}}$  der untersuchten Leitungen

$$k_i = \sqrt{\sum_3^7 (I_{\nu}/I_1)^2} \cdot 100 \%$$

$I_{\nu}$  Stromoberwelle der  $\nu$ -ten Ordnungszahl;  $I_1$  Grundwelle des Stromes

nur 5% ein grosser Klirrfaktor im Strom von  $k_i = 16,9\%$  gemessen (s. Fig. 10). Zur selben Zeit betrug der Klirrfaktor in der Netzspannung  $k_u = 0,67\%$ , also weniger als der Mittelwert aller untersuchten Leitungen.

Der grösste Betrag des Klirrfaktors in der Netzspannung wurde am 20. Mai 1966 in der Meßstelle Nr. 4 in Laufenburg an der Leitung Alb-Süd nach Tiengen-RWE um 15.30 Uhr mit  $k_u = 2,2\%$  gemessen (s. Fig. 4). Der Klirrfaktor im Strom betrug zu dieser Zeit  $k_i = 2,9\%$ , war also nur unwesentlich grösser als der Klirrfaktor  $k_u$  der Netzspannung.

Der prozentuale Oberwellengehalt im Strom ist in starkem Masse abhängig von der Grösse der relativen Leitungsbelastung  $P/P_{\text{max}}$ . Der Klirrfaktor  $k_i$  im Strom in Abhängigkeit von

Tabelle III

Ordnungszahl $v$	Spannung		Strom	
	Mittelwert $\bar{x}$ %	Streuung $\sigma$ %	Mittelwert $\bar{x}$ %	Streuung $\sigma$ %
3	0,42	0,23	0,87	0,73
5	0,80	0,27	1,50	1,00
7	0,20	0,10	0,50	0,31

$P/P_{\max}$  umfasst nach Fig. 14 eine Fläche, deren Grenzkurve hyperbolischen Charakter hat und gegen kleine Werte von  $P/P_{\max}$  stark ansteigt. Bei 50 %  $P/P_{\max}$  beträgt der Grenzwert des Klirrfaktors  $k_i$  ca. 0,5 %, bei 10 %  $P/P_{\max}$  hingegen bereits ca. 9 %.

Da, wie bereits bei der Berechnung des mittleren Stromoberwellengehaltes erwähnt, bei kleinen Werten von  $P/P_{\max}$  ein gegebener prozentualer Fehler kleinere absolute Meßfehler verursacht, ist diesen überdurchschnittlich grossen Stromoberwellen im Kleinlastgebiet keine allzu grosse Bedeutung beizumessen. Von wirtschaftlicher Bedeutung ist jedoch die Tatsache, dass der Stromoberwellengehalt mit steigender relativer Leistung  $P/P_{\max}$  abnimmt und bei Werten von  $P/P_{\max}$  von mehr als 40 % im allgemeinen kleiner als 1 % wird.

Sehr ausgeprägt ist der Stromoberwellengehalt der 220-kV-Leitungen Mühleberg-Hauterive (Nr. 12) und Mühleberg-Bickigen (Nr. 13) bei extrem kleiner relativer Leitungsbelastung  $P/P_{\max}$  von nur ca. 5 %. Die Erklärung dafür dürfte darin lie-

gen, dass die oberwellenbehafteten Magnetisierungsströme der Transformatoren, welche natürlich lastunabhängig sind, bei kleiner Belastung relativ grösser in Erscheinung treten als bei stärker belasteten Leitungen. Dazu kommt wohl noch eine teilweise Kompensation der Magnetisierungsstrom-Grundwelle durch die Leitungskapazität.

Die in Fig. 13 und 14 graphisch aufgetragene Summenhäufigkeit der Spannungs- und Stromoberwellen lässt keine definierte Gesetzmässigkeit in der statistischen Verteilung der Oberwellen erkennen. Aus den mittleren Einzelwerten der Oberwellen der 15 untersuchten Leitungen, deren Summenhäufigkeit in den Fig. 13 und 14 graphisch aufgetragen ist, wurden als Mittelwert  $\bar{x}_v$  und als Streuung  $\sigma_v$  auf Grund folgender Gleichungen ermittelt:

$$\bar{x}_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{vi}$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum (x_{vi} - \bar{x}_v)^2}{N - 1}}$$

worin

- $x_{vi}$  Mittelwert pro untersuchte Leitung
- $N$  Anzahl untersuchter Leitungen (15)

und in Tabelle III zusammengestellt.

**Adresse der Autoren:**

M. Angst, dipl. Elektroingenieur, und Dr. sc. techn. F. Tschappu, Landis & Gyr AG, 6300 Zug.

## Über die Voraussetzungen für den wettbewerbsfähigen Einsatz von elektrischer Energie zur Raumheizung in der Bundesrepublik Deutschland

Von P. Borstelmann, Essen

697.27

*Die Wettbewerbsfähigkeit des elektrischen Heizens war nicht allein durch die inzwischen erfolgte Senkung der Heizstrompreise zu erreichen, sondern nur durch eine technisch-wirtschaftliche Gesamtkonzeption, die sich wesentlich von derjenigen traditioneller Heizungsarten unterscheidet. In Verbindung mit entsprechenden Wärmeschutz-Massnahmen, niedrigen Geräte- und Installationskosten, einer kostensparenden Netzbauweise und einer ausgefeilten Regel- und Steuertechnik ist es möglich, die elektrische Energie trotz ihres relativ hohen Kalorienpreises für die wirtschaftliche und voll konkurrenzfähige Beheizung von Gebäuden aller Art einzusetzen.*

*La faculté concurrentielle du chauffage électrique n'a pas seulement été menagée uniquement grâce à la baisse des prix du courant de chauffage survenue entre-temps, mais bien plutôt par une conception générale, tant économique que technique entièrement différente des méthodes traditionnelles de chauffage. Un isolement calorifuge approprié, des frais d'acquisition et d'installation réduits, un tracé économique du réseau et une technique de commande et de réglage parfaitement au point ont, malgré son prix calorifique relativement élevé, permis l'exploitation de l'énergie électrique en vue du chauffage des immeubles les plus divers à des conditions parfaitement économiques et adaptées à la concurrence présente.*

Österreich und die Schweiz dürfen zu Recht behaupten, die ersten entscheidenden Schritte auf dem Gebiete der elektrischen Speicherheizung schon in den 30er Jahren unternommen zu haben. Aber selbst in der Mitte der 50er Jahre, als man beispielsweise in Österreich bereits Speicherheizungsanlagen mit einer installierten Gesamtleistung von 120 MW registrierte und in der deutschen Bundesrepublik erste praktische Erfahrungen mit dieser Technik zu sammeln begann, war man noch weit davon entfernt, in der elektrischen Speicherheizung eine wettbewerbsfähige Lösung des Raumheizungsproblems zu sehen. Die Elektrizitätsversorgungsunternehmen tolerierten allenfalls diese Art der elektrischen Heizung im Gegensatz zur Direktheizung, die erheblich zu einer Erhöhung der jährlichen Spitzenlast beiträgt, ohne dies durch

eine entsprechend hohe Benützungsdauer zu rechtfertigen. Dem Konsumenten gegenüber wurde die Speicherheizung damals zwar auch als Komfortlösung herausgestellt, für deren Betrieb er, so meinte man allerdings zumindest bis 1960, ruhig mehr als für vergleichbare Heizsysteme bezahlen könne. Abgesehen von Sonderfällen, in denen sich besonders günstige Betriebsergebnisse dadurch ergaben, dass die vorher benützten Heizsysteme oft ausserordentlich unwirtschaftlich betrieben worden waren, z. B. in Schulen, wurde es als normales Ergebnis angesehen, wenn der Betrieb einer elektrischen Speicherheizung um 20 % teurer als der einer vergleichbaren Zentralheizung war.

Bis zum heutigen Tage betrachtet ein Teil der Elektrizitätsversorgungsunternehmen die elektrische Speicherheizung