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: 72 (1981)

Heft: 16

Artikel: Anlaufstrommessungen von Wärmepumpen und Auswirkungen auf das Netz

Autor: Egli, F. / Künzler, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905146

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: 09.12.2025

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

Anlaufstrommessungen von Wärmepumpen und Auswirkungen auf das Netz

Von F. Egli und D. Künzler

Die steigende Anzahl Wärmepumpen, vor allem bei Einfamilienhäusern, gibt neue Probleme bei der Netzplanung für die Elektrizitätswerke. Die hohen Anlaufströme bewirken störende Spannungsschwankungen, können das Wiedereinschalten des Netzes nach Unterbrüchen erheblich erschweren und geben eine saisonale Mehrbelastung im Winter. Nachfolgend werden Erfahrungen mit dem Betrieb von Wärmepumpen in einem kleineren Versorgungsnetz kommentiert.

La multiplication des pompes à chaleur, notamment dans le secteur domestique (maisons familiales), pose aux entreprises d'électricité des problèmes de planification nouveaux. Les importants courants de démarrage causent des fluctuations de tension; ils peuvent compromettre le réenclenchement du réseau après une interruption, et en hiver, ils occasionnent une charge supplémentaire sensible. Le présent article commente les expériences faites dans un réseau de distribution moyen à petit.

1. Einleitung

Die Substitution von Erdöl zur Raumheizung liegt nicht nur im Interesse unserer Volkswirtschaft, sondern auch in jenem der Verbraucher. Die Wärmepumpe ist dazu besonders geeignet. Der Asynchronmotor gilt als der einfachste Antrieb einer Wärmepumpe. Für Anlagen unter 12 kW wird heute ein voll- oder halbhermetischer Verdichter eingesetzt. Die vollhermetischen Verdichter sind mit Asynchronmotoren mit kleinem Schwungmoment ausgerüstet. Das Problem des Anlaufstromes muss von der Höhe und der Dauer her angegangen werden. Im Sinne einer möglichst weitgehenden Substitution sollten möglichst viele Wärmepumpen angeschlossen werden, ohne dabei ein überdimensioniertes Verteilnetz zu beanspruchen. Die Registrierung der raschen Schalt-Abläufe wurde bei den untersuchten Anlagen mit Hilfe eines Digitalspeicher-Oszilloskops aufgezeichnet.

2. Direktanlauf von Wärmepumpen-Kompressoren

Die konstruktive Besonderheit der hermetischen Kompressoren besteht in einem Asynchronmotor, der im Inneren eines Gehäuses im Kältemitteldampf liegt. Der Rotor des Motors sitzt direkt auf der Kurbelwelle. Durch diese Bauart erhalten die Kompressoren eine relativ kleine Schwungmasse. Der Anlaufstrom (I_A) eines Kompressors (s. Fig. 1) klingt innert der Zeit (T_A) von 2 bis 4 Perioden ab und ist nie höher als der Kurzschlußstrom (I_K). Bereits in der zweiten Periode ist der Anlaufstrom auf $^2/_3 \cdot I_A$ zurückgegangen. Der Anlaufstrom beträgt das 4- bis 7fache des höchstzulässigen Dauerbelastungsstromes (I_{BM}). Die Höhe und Dauer des Anlaufstromes ist vom Druck und der Stellung des Verdichters sowie des Einschaltzeitpunktes abhängig. Der Betriebsstrom (I_B) ist normalerweise kleiner als der höchstzulässige Dauerbelastungsstrom und ist von den Temperaturen im Kondensator und Verdampfer abhängig, welche den Druck im Verdichter bestimmen.

3. Möglichkeiten zur Senkung des Anlaufstromes

Die Kompressoren können auf verschiedene Arten eingeschaltet werden:

- Direktanlauf
- Y/Δ-Anlauf
- Teilwicklungsanlauf
- Widerstandsanlauf
- Anlauf über einen Frequenzwandler

Damit der Motor anläuft, muss das Anlaufdrehmoment (M_A), welches proportional I_A^2 ist, grösser sein als das Widerstandsdrehmoment (M_W) des stillstehenden Kompressors. Falsche,

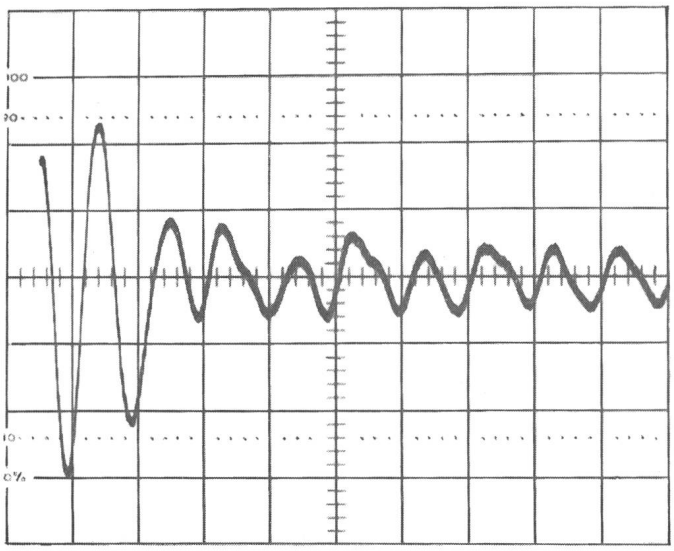

Fig. 1 **x-Achse: 20 ms/div; y-Achse: 20 A/div**
Direktanlauf eines Halbhermetikkompressors 4,5 kW ohne Druckausgleich
(I_K = 51 A, I_{BM} = 9 A)
I_A = 43 A; I_A = 60 ms

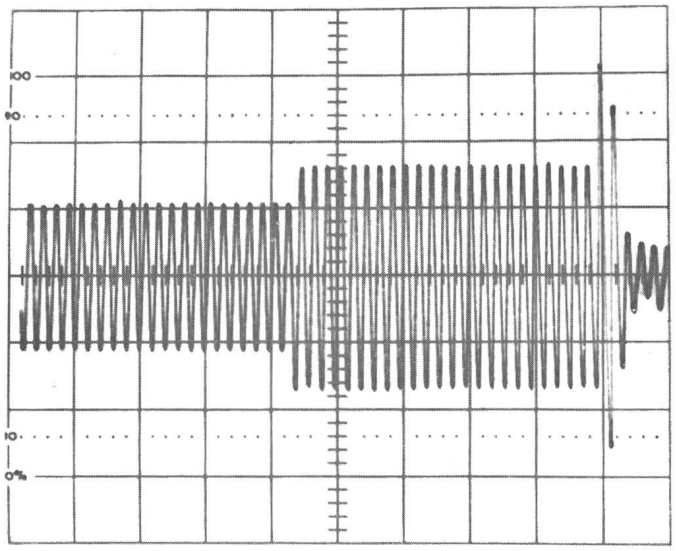

Fig. 2 **x-Achse: 100 ms/div; y-Achse = 20 A/div**
Kompressor wie in Fig. 1 aber mit 2stufigem Anlasswiderstand 10/5 Ω ohne Druckentlastung. Der Motor dreht erst nach dem Kurzschliessen der Anlasswiderstände
I_1 = 16 A; I_2 = 24 A;
I_A = 44 A; T_A = 950 ms

zu gross bemessene Widerstände im Statorkreis als Anlaufstrombegrenzung sind unwirksam, da der Kompressor erst beim Kurzschliessen der Widerstände anläuft (s. Fig. 2). Ein solcher Anlauf wirkt sich aufs Netz viel störender aus als der Direktanlauf. Die wirksamste Massnahme, das Widerstandsdrehmoment zu verkleinern, besteht in einem Druckausgleich zwischen Kondensator und Verdampfer. Dieser Druckausgleich wird mit einer Bypass-Leitung mit Magnetventil von der Ausstoss- zur Ansaugseite geschaffen. Im weiteren ist auch eine Absaugschaltung möglich, welche auf der Saugseite den herrschenden Druck nach dem Abschalten senkt, was jedoch bei Spannungsausfall nicht wirksam ist. Mit diesen beiden Massnahmen wird ein Aggregat auch mit Anlaufstrombegrenzung ohne Probleme anlaufen.

– Y/Δ-Anlauf ist durch den entstehenden kurzen Unterbruch bei der Umschaltung ungeeignet. Die unterbruchslose Umschaltung über Widerstände ist besser, aber wegen der Verwendung von vier 3poligen Relais relativ teuer.

– Beim Teilwicklungsstart wird die Statorwicklung in zwei Wicklungen mit höherem Widerstand unterteilt. 400 bis 800 ms nach dem Anlauf wird die zweite Wicklung parallelgeschaltet. Bei Druckausgleich und richtiger Dimension kann der Anlaufstrom auf $I_A = 1{,}5\, I_{BM}$ verkleinert werden. Die Abstimmung der Wicklungen erfolgt wie beim Widerstandsanlauf.

– Beim Widerstandsanlauf werden Widerstände (R_S) in Serie zum Stator geschaltet. Auch diese Anlaufstrombegrenzung ist nur mit Druckausgleich wirksam. In Figur 3 ist der Verlauf von I_A dargestellt bei grösstem Seriewiderstand. Die optimalen Widerstandswerte werden in Versuchen ermittelt. Als Parameter gilt der Ausgleichsdruck, welcher durch die Maximaltemperaturen von Wärmequelle und Speicher gegeben ist. Zum Beispiel ergibt sich ein Ausgleichsdruck von 6 bar bei einer Wärmequelle von 5 °C und einer Speichertemperatur von 50 °C. Die Kurve ist in Figur 4 dargestellt. Damit der Kompressor noch anläuft, wird bei steigendem Ausgleichsdruck der grösstmögliche Widerstand kleiner.

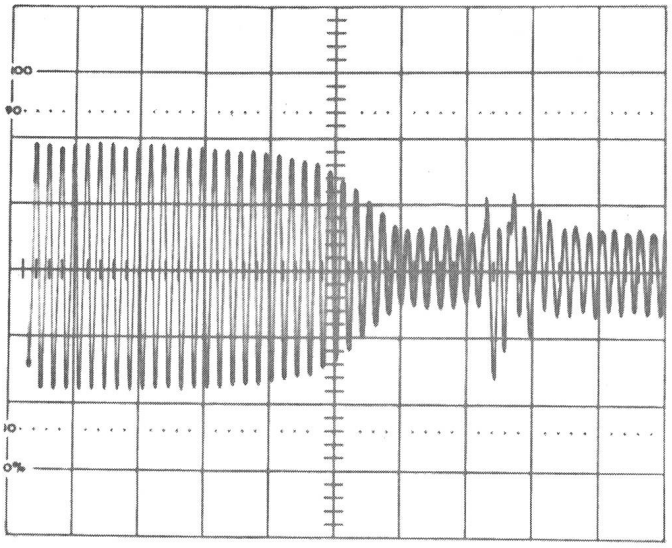

Fig. 3 **x-Achse: 100 ms/div; y-Achse = 10 A/div**
Kompressor wie in Fig. 1 mit Druckausgleich und 1stufigem Anlasswiderstand 15 Ω
$I_A = 14$ A; $T_A = 580$ ms

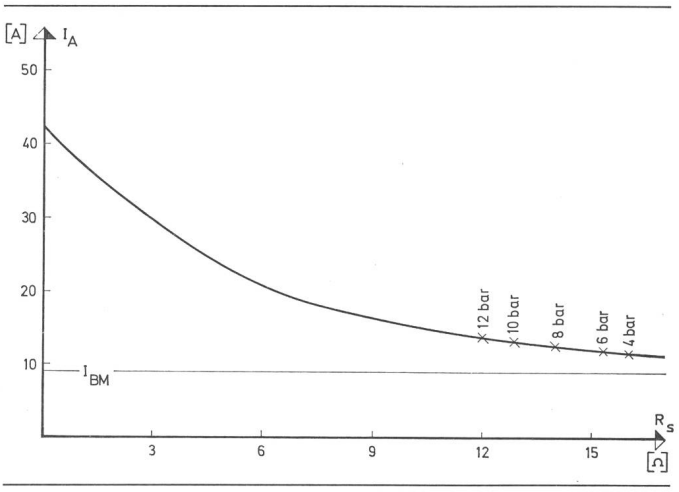

Fig. 4 **Einschaltstrom I_A in Abhängigkeit des Anlasswiderstandes R_S. Die optimalen R_S sind für die verschiedenen Ausgleichsdrücke p_A eingezeichnet.**
4,5 kW Kompressor $I_{BM} = 9$ A; $I_K = 51$ A

– Durch einen Frequenzwandler kann ein weicher Anlauf garantiert werden. Dieser Apparat ist sehr teuer und dürfte kaum Verwendung finden.

Die Kurvenform des Anlaufstromes kann mit den Anlaufstrombegrenzungen verändert werden. Für die Beeinflussung des Netzes ist nicht nur der maximale Anlaufstrom massgebend, sondern sein Integral über die Zeit:

$$\int_0^{T_A} I_A \cdot dt$$

Beim Vergleich von zwei verschiedenen Strombegrenzungen ist:

$$\int_0^{T_{A2}} I_{A1} \cdot dt < \int_0^{T_{A2}} I_{A2} \cdot dt$$

wobei der maximale Anlaufstrom I_{A1} immer grösser als I_{A2} ist, d. h., das Zeitintegral ist bei Direktanlauf am kleinsten.

4. Anlaufströme vom Standpunkt der Elektrizitätswerke

Aus volks- und energiewirtschaftlichen Gründen sollten möglichst viele Wärmepumpen-Anschlussgesuche genehmigt werden. Nun treten Wärmepumpen aber nicht im ganzen Netz gleichmässig verteilt auf, sondern häufen sich stark in Neubaugebieten. Um die störenden Einflüsse auf ein vertretbares Mass zu reduzieren, können folgende Massnahmen empfohlen werden:

1. Es werden nur Wärmepumpen mit Speicher zugelassen. Dies kann im Extremfall eine Reduktion der Anläufe bis auf einen pro Tag ergeben und verlängert zugleich die Lebensdauer der Wärmepumpen.

2. Anlagen ab 4 kW sollten mit wirksamen Anlaufstrombegrenzungen ausgerüstet sein, wobei $I_A = 2$ bis $3 \cdot I_{BM}$ einzuhalten wäre.

3. In schwachen Netzen sollte mit der maximalen Spannungsänderung (z. B. Werte aus der CENELEC-Kurve) und dem Leitungswiderstand die maximale Stromänderung bestimmt werden.

4. Die Wärmepumpen werden auf ein Lastkommando der Rundsteueranlage geschaltet.

5. Über ein Verzögerungsrelais wird der Einschaltzeitpunkt bei Netzunterbruch und bei Freigabe durch die Rundsteueranlage gestaffelt.

5. Schaltversuche im Netz

Bei einem Einfamilienhausquartier (s. Fig. 5) mit einem 630-kVA-Transformer 16 kV/380/220 V wurden auf der Sekundärseite die Einschaltströme wie in Figur 6 gemessen. In diesem Quartiernetz «Studenbühl» befinden sich 61 Einfamilienhäuser, davon besitzen zehn monovalente Wärmepumpenheizungen mit insgesamt 58 kW Anschlussleistung. Am 23. Februar 1981 (Tabelle I), einem kalten Wintertag, wurde dieses Netz zweimal während einer Stunde ausgeschaltet, von 12.15 bis 13.15 Uhr und 23.00 bis 24.00 Uhr, und der Einschaltstrom unmittelbar nach der Abschaltung, nach 30 min und nach 60 min Pause, gemessen. Nachdem das Netz wieder in Betrieb war (nach 60 min Unterbruch), wurden über die Rundsteueranlage die Wärmepumpen ein- und ausgeschaltet. In dieser Nacht wurde ein Gleichzeitigkeitsfaktor (g) von 0,6 der Wärmepumpen ermittelt. Der Gleichzeitigkeitsfaktor der installierten Leistung (1700 kW, Tabelle II) zur Leistungsspitze (255 kW) bei der Trafostation um 23.00 Uhr betrug 0,15. Es zeigte sich in dieser kalten Nacht eine Verschiebung der Mittagsspitze in die Nacht. Die Mittagsspitze lag um 13 % tiefer als die Nachtspitze.

Mittags und abends wurden die Einschaltströme $I_E(t)$ aufgenommen (Tabelle III). Das Verhältnis (x) zeigt die Stromüberhöhung des maximalen I_E im Verhältnis zum Betriebsstrom (I_B) vor dem Netzunterbruch. Nach der Zeit (T_B) ist die Stromüberhöhung auf die Hälfte gesunken. In Figur 7 sind zwei Einschaltverläufe aufgezeigt, um 23.01 und 24.00 Uhr.

Gleichzeitigkeitsfaktor nach Netzunterbruch

Durch Abschalten der Wärmepumpe über die Rundsteueranlage kann die Leistung der laufenden Wärmepumpe wie folgt berechnet werden:

Aus dem Abschaltoszillogramm wird eine Stromdifferenz von 75 A abgelesen. Bei einem $\cos\varphi$ von 0,8 werden ca. 34 kW abgeschaltet. Bei 58 kW installierte Wärmepumpenleistung ergibt dies einen Gleichzeitigkeitsfaktor in einer kalten Nacht von 0,6 nach einem 1stündigen Netzunterbruch.

Klima vom Messtag, 23. Februar 1981 — Tabelle I

Temperaturmaximum	– 0,5 °C
Temperaturminimum	– 9,5 °C
Durchschnittstemperatur	– 5,5 °C
Bewölkung	8/8 (ganzer Tag bewölkt)
Wind	ca. 3 km/h

Anschlusswerte im Quartier Studenbühl — Tabelle II

Verbraucher	Anzahl	Gesamtleistung kW
Licht		ca. 108
Kochherd + Backofen	54	596
Kühlschrank + Tiefkühltruhen	95	17
Waschmaschinen	53	303
Geschirrwaschmaschinen	44	153
Tumbler	24	81
Umwälzpumpen + Motoren	24	36
Boiler 8 h	17	55
Boiler 4 h	7	24
Speicherheizung	5	93
Direktheizung, Zusatzheizung	10	75
Sauna	9	73
WP 2 kW	1	2
3 kW	1	3
3,8 kW	6	23
5,4 kW	1	5
10 kW	1	10
15 kW	1	15
Baustellen	6	30
Total Anschlussleistung		1702 kW

Messresultate der Schaltversuche — Tabelle III

Zeit	Spannungspause (min)	I_E max. (A)	I_B (A)	x *)	T_E (ms)
12.16	1	540	260	2,1	200
12.43	26	670	260	2,6	180
13.20	63	720	260	2,8	220
23.01	1	620	330	1,9	140
23.31	29	720	330	2,2	240
24.00	58	810	330	2,5	200

*) Das Verhältnis x wird mit längerem Unterbruch grösser.

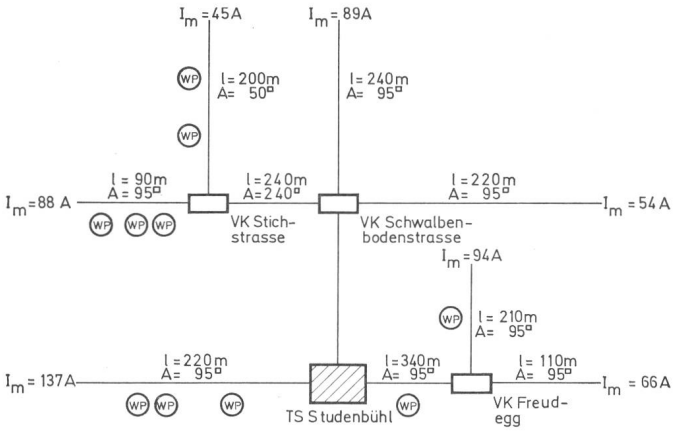

Fig. 5 Quartiernetz Studenbühl
Maximale Stromänderung I_m bei 3prozentigem Spannungsabfall am Ende der Leitung

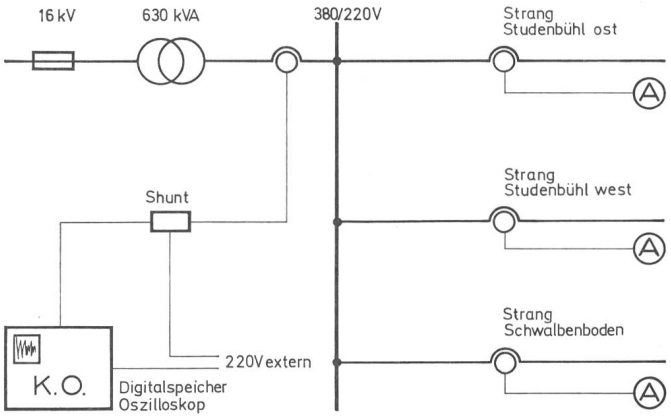

Fig. 6 Messeinrichtung
1poliges Prinzipschema

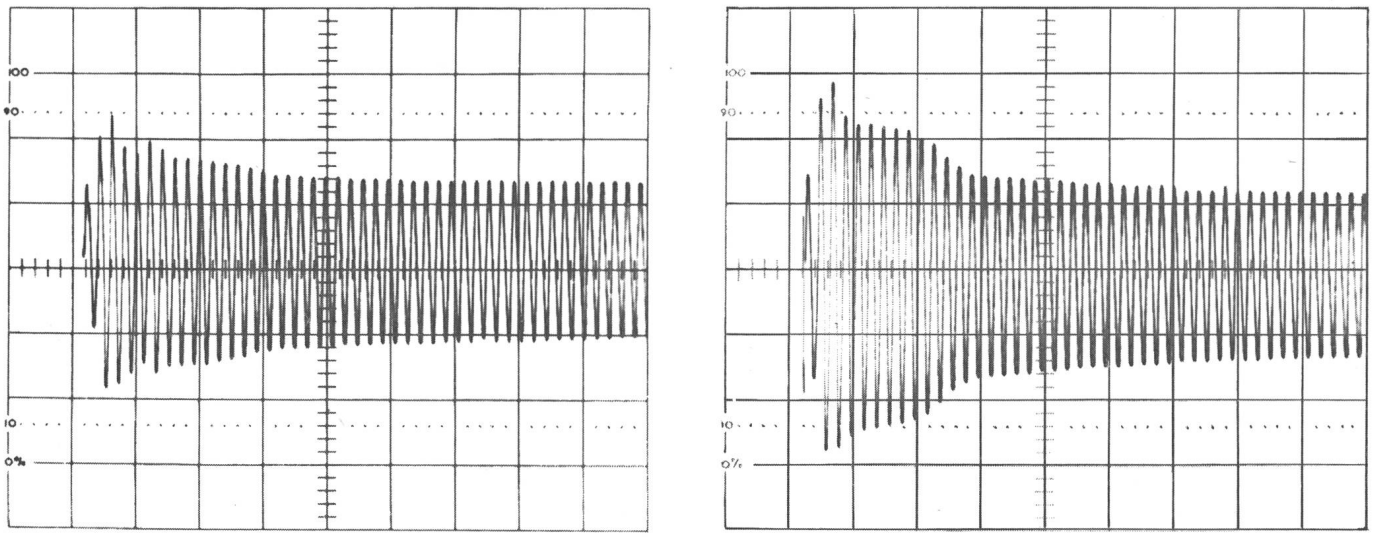

Fig. 7 **x-Achse: 100 ms/div; y-Achse: 400 A/div**
Sekundär Einschaltstrom $I_E(t)$ des Transformators Studenbühl in der Nacht
a) $I_E(t)$ nach 1 Minute Netzunterbruch b) $I_E(t)$ nach 60 Minuten Netzunterbruch

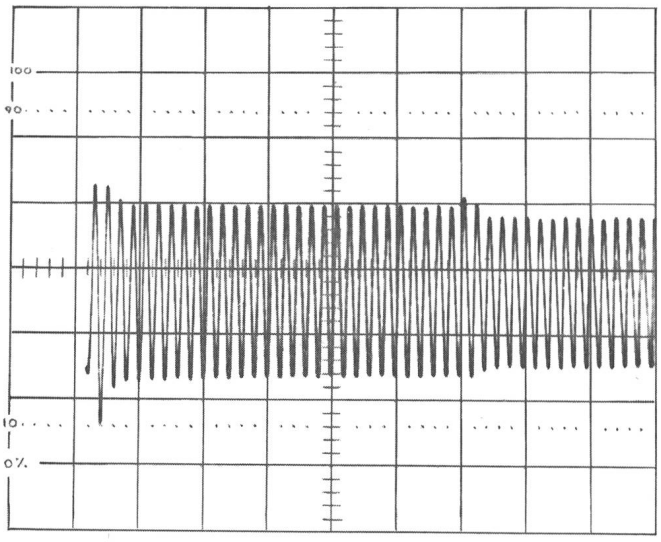

Fig. 8 **x-Achse: 100 ms/div; y-Achse: 400 A/div**
Einschaltstrom von 6–9 WP mit einer Gesamtleistung von 34 kW auf einer Grundlast von 340 A

Einschaltung der Wärmepumpe auf Grundlast

Durch einzelne Messung der Einschaltcharakteristik jeder Wärmepumpe kann das Einschaltdiagramm (Fig. 8) analysiert werden.

Eine der untersuchten Wärmepumpen ist mit Anlaufstrombegrenzung ausgerüstet, wird aber erst nach 600 ms durch Direktanlauf eingeschaltet. Eine vorher ausgemessene 10-kW-Wärmepumpe besitzt dieselbe Verzögerung, und der Strom ergibt bei 3fachem Dauerbelastungsstrom in der ersten Stufe und bei 6fachem Dauerbelastungsstrom bei Direktanlauf die Stromerhöhungen wie in Figur 8.

Der gesamte Einschaltstromstoss der Wärmepumpe beträgt ca. 280 A. Abzüglich den 55 A der 10-kW-Wärmepumpe ergibt dies bei $I_A = 6\, I_{BM}$ eine Leistung von ca. 24 kW bei $\cos\varphi = 0{,}8$.

Der Stromstoss von 280 A besteht nur über eine halbe Periode oder 10 ms und sinkt danach auf die Hälfte. Dieser kurze Impuls beeinflusst die Beleuchtung nicht (kein Flackern) und wirkt sich auch anderweitig nicht negativ aus. Bei grösserer Wärmepumpenleistung lässt sich eine Verschachtelung durch den Einbau eines Verzögerungsrelais erreichen.

6. Schlussbemerkungen

Der Anlaufstrom von Wärmepumpen kann unter dem 2½fachen des höchstzulässigen Dauerbelastungsstromes gehalten werden. Für kleine Wärmepumpen ist dies aber nicht nötig, da sich der kurze Stromimpuls nicht störend auswirkt. Bei zukünftigen Anschlussbedingungen sollte diese Erkenntnis berücksichtigt und nach Leistung der Wärmepumpe differenziert werden. Bei Netzunterbruch oder Schnellwiedereinschaltungen konnten keine Nachteile durch den Betrieb von Wärmepumpen festgestellt werden. Bei schwachen Netzteilen ist eine Berechnung der maximalen Stromänderung zu empfehlen.

Die Wärmepumpenhersteller sollten Anlaufstrombegrenzungen entwickeln, welche tatsächlich funktionieren. Um die Einschalthäufigkeit zu vermindern, sind die Wärmepumpenanlagen mit einem angemessenen Speicher auszurüsten.

Die Entwicklung der Wärmepumpe sollte nicht durch zu strenge Vorschriften der Elektrizitätswerke gebremst werden. Wichtiger ist auf die Dauer, den Ausbau der Verteilnetze der zu erwartenden Belastungen anzupassen.

Adresse der Autoren
F. Egli, dipl. Ing. ETH, und *D. Künzler*, Ing. HTL, Elektrizitätswerk Höfe, 8808 Pfäffikon.