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: 24

Artikel: Computergestütztes Erfassen und Auswerten der thermischen Belastung eines städtischen Verteilnetzes

Autor: Brechbühler, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904904

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: 07.07.2025

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

Computergestütztes Erfassen und Auswerten der thermischen Belastung eines städtischen Verteilnetzes

A. Brechbühler

Der einzige Verkaufskanal für die elektrische Energie ist das Übertragungsnetz. Damit dieses genügend sicher und gleichzeitig wirtschaftlich betrieben werden kann, ist es notwendig, dass die thermische Auslastung der bestehenden oder projektierten Anlagen bekannt ist und bewirtschaftet werden kann. Die Aufgabe besteht darin, auch dem Betreiber eines städtischen Mittel- oder Niederspannungsnetzes in nützlicher Zeit die gewünschten Unterlagen von allen Betriebsmitteln wirtschaftlich zu beschaffen. Als Lösungsmöglichkeit wird ein Konzept beschrieben, das auf dem Tischcomputer HP 85 basiert.

Le seul canal de vente pour l'énergie électrique est le réseau de transmission. Afin que celui-ci soit suffisamment sûr et qu'il puisse être en même temps exploité de manière rentable, il est nécessaire que l'utilisation de la capacité thermique soit connue et puisse être gérée. La mission consiste à procurer, en temps utile et de manière économique, également aux services d'un réseau municipal à moyenne ou basse tension, les documents souhaités sur les moyens d'exploitation. Comme solution possible, voici la description d'un concept basé sur l'ordinateur de table HP 85.

Adresse des Autors

A. Brechbühler, El.-Ing. HTL, Elektrizitätswerk der Stadt Biel, Postfach, 2500 Biel 4.

1. Einleitung

Transformatoren und in einem städtischen Netz praktisch alle Leitungen werden in ihrer Grösse durch die aus dem Belastungsstrom resultierende thermische Belastung dimensioniert. Hohe Kosten für den Netzausbau, steigende Anschlusswerte, berechtigte Verpflichtungen zu Koordination mit anderen Leitungs- und Strassenbauarbeiten und nicht zuletzt ein genügend sicherer Netzbetrieb führen zum Bedürfnis, die Netzbelastungen systematisch zu erfassen und im Betrieb oder bei Projekten ingenieurmässig zu bewirtschaften.

Mittel- und Niederspannungsnetze besitzen gegenüber Anlagen mit höheren Spannungen wesentlich mehr Elemente, die aber im einzelnen weniger kapitalintensiv sind. Für den Netzbetrieb ist es trotzdem notwendig, von jedem Betriebsmittel die thermische Belastung zu kennen. Da diese nicht direkt gemessen werden kann, ist sie mit einem in der Praxis anwendbaren Rechenverfahren aus dem Betriebsstrom zu ermitteln.

Diese Tatsachen führen zur Aufgabe, mit einem wirtschaftlichen Aufwand genügend - aber so wenig wie möglich - Betriebsdaten zu erfassen, die thermische Belastung zu berechnen und die Auswertung in geeigneter Form darzustellen.

Die Praxis zeigt, dass dieses Problem ohne EDV nicht lösbar ist. Heute ist es sinnvoll, die Aufgabe mit einem Tischcomputer zu bewältigen. In den folgenden Kapiteln wird eine entsprechende Lösungsmöglichkeit beschrieben, die sich in der Praxis seit einigen Jahren bewährt hat.

2. Systemanforderung

Ein praxisgerechtes Datenverarbeitungssystem für die Erfassung und Auswertung der Netzbelastungen muss die nachstehenden Forderungen möglichst gut erfüllen:

- Genügend genaues, für das ganze Netz anwendbares Rechenverfahren zur Bestimmung der maximal zulässigen thermischen Belastung jedes Netzelementes bei Normalbetrieb. Der Kurzschlussfall ist nicht zu berücksichtigen.
- Die Wirtschaftlichkeit muss gewährleistet sein, d.h. die Einsparungen bei Netzausbauten müssen grösser sein als die gesamten Systemkosten.
- Ausbaubare und anpassungsfähige Software, die leicht zu warten ist.
- Darstellungsmöglichkeit als Graphik oder in Tabellenform
- Darstellung des Ist-Belastungszustandes aller Netzelemente
- Selektive Darstellung der hochbelasteten Netzelemente
- Berechnung des Einflusses von zusätzlichen Lasten auf die Netzbelastung
- Berechnung der Auswirkung einer Netzumschaltung
- Rasche und einfache Nachführung von Mutationen
- Datensicherung

3. Rechenverfahren zur Bestimmung der maximal zulässigen thermischen Belastung

Will man wissen, wie hoch ein Netzelement thermisch belastet ist, muss zuerst der maximal zulässige Wert definiert werden.

Bei der Analyse ganzer Versorgungsnetze kann nur ein vereinfachtes Berechnungsverfahren angewendet werden. Für genaue Rechenverfahren sind nicht alle notwendigen Parameter bekannt oder sind nur durch einen unverhältnismässig grossen Aufwand zu ermitteln.

Ein angenähertes Verfahren ist dann anwendbar, wenn die wichtigsten Einflussgrössen berücksichtigt sind und sich das Resultat auf der sicheren Seite befindet.

Erdbodentemperaturen Tabelle I

Jahr	1979	1980	1981	1982	1983	
Monat	Höchste pro Monat gemessene Werte in °C					Maximalwert
Januar		8	x	4	8	8
Februar		8	x	4	5	8
März		11	x	8	8	11
April		14	x	12	10	14
Mai		17	x	19	14	19
Juni		x	x	19	19	19
Juli		x	21	23	27	27
August	20	x	22	22		22
September	18	x	22	21		22
Oktober	15	x	18	19		19
November	12	x	12	14		14
Dezember	9	x	8	8		9

x keine Messungen vorhanden

Im EW Biel werden folgende Verfahren angewendet:

3.1 Transformatoren

Die Nennleistung wird als maximale thermische Belastung definiert. Die maximal auftretende mittlere Belastung während 30 Minuten wird in Relation zur Nennleistung gestellt.

3.2 Kabel

Die maximal zulässige thermische Belastung wird gemäss Norm VDE 0298 Teil 2/11.79 definiert. Die maximal auftretende mittlere Belastung während 30 Minuten wird in Relation zu diesem Wert gestellt.

Die VDE Norm 0298 berücksichtigt:
- ein einzelnes Tageslastspiel
- Leitermaterial
- Leiterquerschnitt
- Isolationsmaterial
- Kabelkonstruktion
- zulässige Leitertemperatur
- Rohr- oder Erdverlegung
- Erdbodentemperatur
- Erdbodenwärmewiderstand
- Belastungsgrad (Verhältnis der mittleren Belastung zur maximalen Belastung)
- Kabelballung

3.3 Erdbodentemperatur

Die Ergebnisse von Messungen der Erdboden-Temperaturen sind in Tabelle I zusammengestellt.

Messort: Ohmweg, Transformatorenstation Brüel, Gemeinde Biel
Messsonde: PT 100
Tiefe der Messsonde: 0,9 m unter der Oberfläche
Aufbau der Strasse: 10 cm Belag
90 cm Wandkies

Das Programm «WATT+D» bestimmt die maximal zulässige Kabelbelastung bei einer Erdbodentemperatur von +15 °C.

3.4 Messungen des thermischen Bodenwiderstandes

Der thermische Widerstand des Erdbodens hängt stark von der Art des verwendeten Füllmaterials ab. Tabelle II gibt einen Überblick über die Ergebnisse von Messungen bei unterschiedlichem Material.

Thermischer Bodenwiderstand Tabelle II

Material	Messtiefe cm	Thermischer Bodenwiderstand in K·m/W
Rückfüllmaterial und gewachsener Boden	65 65	0,53 0,48
Rückfüllmaterial, Sand	60	0,50
Rückfüllmaterial, Wandkies	20	1,12
Lehm	140	0,39
Wandkies, neu eingefüllt	80	1,18
altes Rückfüllmaterial	80	0,62
altes Rückfüllmaterial	60	0,51
Gewachsener Boden	80	0,41
Wandkies sandig	60	0,53
Wandkies grob	60	1,53
Wandkies Sand	80	0,42
Wandkies	80	0,72
Humus	50	0,35
felsig	20	1,23
felsig	30	1,02
Sand	60	0,46
Sand	60	0,42
Sandhaufen	–	0,64
Sand	–	0,58
Sand	–	0,65

Das Programm «WATT+D» bestimmt die maximal zulässige Kabelbelastung bei einem thermischen Erdbodenwiderstand von 1K·m/W.

4. Die Lösung mit dem Programm «WATT+D»

4.1 Messung und Datenerfassung

Der Betriebsstrom wird in den einzelnen Verteilanlagen mit mobilen Geräten gemessen und auf Messstreifen oder Datenkassetten aufgezeichnet. Die Intervalle zwischen den Messungen betragen normalerweise für:
- Transformatoren 1 Jahr
- Kabelabgänge in Transformatorenstationen 2 Jahre
- Kabel zwischen Verteilkabinen 5 Jahre

Für die Auswertung reicht erfahrungsgemäss ein einziges Tageslastspiel pro Messung. Die Messungen werden in den Monaten Oktober bis März durchgeführt und jedes Jahr zyklisch vertauscht. Bei Transformatoren werden die Ströme der 3 Phasen gemessen, das gleiche gilt für Kabel, die höher als 80% belastet sind. Bei den anderen Leitungen wird jeweils nur eine Phase gemessen. Dieses Konzept erlaubt eine maximale Anzahl Messungen mit den vorhandenen Messgeräten bei genügender Messgenauigkeit.

Je nach Messwerterfassung erfolgt die Dateneingabe in den Rechner mit Hilfe eines Digitalisiertisches, oder die Daten werden direkt ab Magnetband vom Rechner erfasst. Auf Wunsch können die Daten auch über die Tastatur eingegeben werden.

Der Rechner vergleicht die neuen mit den gespeicherten Daten, erlaubt eine Plausibilitätsprüfung und legt sie auf dem Massenspeicher ab. Auf diesem ist pro Objekt Platz für 4 Tageslastspiele reserviert. Pro Tageslastspiel sind 48 Werte gespeichert, d.h. pro 30 Minuten ein Wert. Dieser ist der quadratische Mittelwert aller in dieser Zeitspanne gemessenen Werte.

Sind bereits 4 Tageslastspiele gespeichert, überschreibt eine 5. Messreihe die ältesten Daten nach dem Schieberegisterprinzip. In der Auswertung erlauben die 4 gespeicherten Messreihen eine Beurteilung der Genauigkeit der Stichproben und der Belastungsentwicklung.

4.2 Datenauswertung

Die einmal gespeicherten Werte können gemäss den Systemanforderungen ausgewertet werden. Die Berechnungen erfolgen wahlweise für das ganze Netz oder für einzelne Elemente. Insbesondere sind dies:

1. Übersichtstabelle aller gespeicherten Objekte mit ihrer thermischen Belastung.

2. Übersichtstabelle aller gespeicherten Objekte, deren thermische Belastung einen frei wählbaren Wert überschreitet.

3. Ausgabe aller gespeicherten Stammdaten pro Objekt mit den zugehörigen Messwerten, Maximalwerten, Mittelwerten und der thermischen Belastung in der Form
- numerische Tabelle (Matrix-Drukker)
- tabellarische Zusammenfassung mit vereinfachtem Diagramm (Matrix-Drucker)
- tabellarische Zusammenfassung mit mehrfarbigem Diagramm (Plotter).

4. Vor der Verarbeitung gemäss Ziffer 1-3 können die gespeicherten Daten wie folgt verändert werden:
- Addition oder Subtraktion einer über 24 Stunden konstanten Last.
- Multiplikation mit einem beliebigen Faktor.
- Addition oder Subtraktion einer Industrielast.
- Addition oder Subtraktion einer Heizlast gemäss Freigabezeiten.
- Addition oder Subtraktion einer beliebigen Last zu einem beliebigen Zeitpunkt.
- Eine beliebige Anzahl gespeicherter Objekte addieren oder subtrahieren; z.B. Transformatoren bei einer Mittelspannungsumschaltung.
- Stammdaten verändern, z.B. grösserer Kabelquerschnitt, Kabelballung, Transformator anstelle eines Kabels, grössere Transformatorenleistung usw.

5. Ausdruck der Messaufträge für das ganze Netz mit Berücksichtigung der vorgeschriebenen Messintervalle. Neben dem zu messenden Objekt wird auch der Messbereich angegeben.

6. Werte für Lastflussberechnungen. Je nach Schaltung (z.B. bei Ausfall eines Unterwerkes) müssen die Betriebsströme vermascht betriebener Netzteile mittels einer Lastflussberechnung bestimmt werden, bevor die thermische Belastung berechnet werden kann. Die für das vom EW Biel verwendete «Load-Flow»-Programm Univac notwendigen Belastungsdaten werden mit diesem Programmteil geliefert. Die Lastflussberechnung wird in einem externen Rechenzentrum durchgeführt.

5. Beurteilung des Systems

Einige Jahre Betriebserfahrung mit der Auswertung der thermischen Netzbelastung haben bestätigt, dass das Vorgehen gut anwendbar und wirtschaftlich ist. Brachliegende Netzkapazitäten, Schwachstellen, Entwicklungstendenzen und Einflüsse von zusätzlichen Lasten werden durch das System sichtbar. Nur mit diesem Wissen ist eine fachlich richtige Bewirtschaftung, Planung sowie ein Ausbau des Verteilnetzes überhaupt möglich. Selbstverständlich muss der Netzingenieur bei seiner Tätigkeit noch viele andere Faktoren berücksichtigen. Das umfassende Wissen über den Netzzustand ist aber eine wesentliche Entscheidungsgrundlage.

Die Investitionen für das ganze System werden in kürzester Zeit durch eingesparte oder richtig eingesetzte Netzbaukosten amortisiert. Es kann aus verschiedenen Gründen gespart werden, so zum Beispiel:
- Anstelle einer Netzverstärkung werden hochbelastete Netzelemente durch Lastumschaltungen auf freie Netzkapazitäten entlastet.
- Die frühzeitige Koordination mit anderen Tiefbauarbeiten wird durch die Kenntnis der Netzbelastung ermöglicht.
- Ausbauten müssen nicht als Feuerwehrübung erfolgen, sondern können sorgfältig geplant werden.
- Bei Ausbauten werden genügend, aber nicht überdimensionierte Reserven eingebaut.

PROZENTUALE AUSLASTUNG DER 0.4 kV LEITUNGEN

(NACH VDE - BERECHNUNG)

ADRESSE:	AELTESTE MESSUNG	2. MESSUNG	3. MESSUNG	4. MESSUNG	WERTE >80 %
S058-258(1)	28	14	51	47	
S058-258(2)	0	28	25	27	
S058-258(3)	12	23	32	26	
S058-261	3	6	4	5	
S058-BRUEG53	0	1	6	4	
S058-FTT	6	5	9	11	
S059-047(1)	41	73	80	68	*****
S059-047(2)	0	0	15	20	
S059-162	0	0	32	30	
S059-174(1)	0	24	26	29	
S059-174(2)	0	18	26	23	
S059-FOR.	0	26	23	20	
S059-GOTT71	0	0	6	7	
S059-ISCHER	0	0	34	29	
S059-MUE(NO/WE)	0	0	29	35	
S059-MUE(NORD)	0	0	41	44	

Fig. 1

Fig. 1
Zusammenstellung der Netzelemente und ihrer thermischen Belastung

PROZENTUALE AUSLASTUNG DER 0.4 kV LEITUNGEN

(AUSDRUCK DER OBJEKTE MIT >= 80 % AUSLASTUNG)

ADRESSE:	AELTESTE MESSUNG	2. MESSUNG	3. MESSUNG	4. MESSUNG	WERTE >80 %
S002-228(1)	15	19	83	83	*****
S004-084(1)	125	131	140	108	*****
S004-084(2)	93	103	104	85	*****
S004-085	0	0	17	90	*****
S004-301	0	0	28	88	*****
S005-098	74	85	50	75	*****
S005-135	77	88	87	89	*****
S006-087	102	105	91	46	*****
S007-085(3)	99	73	85	90	*****
S007-102	46	45	64	80	*****
S009-088	0	90	102	102	*****
S009-183	100	101	105	107	*****
S009-GASS(1)	0	63	55	101	*****
S009-GASS(2)	0	63	55	101	*****
S009-SCHUELER	68	75	78	80	*****

Fig. 2
Zusammenstellung der Netzelemente, deren thermische Belastung > 80% ist

BRUEGGSTRASSE SUEDLICH WESTSEITE
STRANG 2
VK 258 BRUEGGSTRASSE 78

STRANG-NR: S058-258(2)
LEITUNG 0.4 kV
LEITUNGSTYP: BLEIKABEL

MESSDATUM:	(TAG.MONAT)	00.00	00.12	00.03	30.09
	(JAHR)	0	1976	1981	1982
	(WOCHENTAG)				DONN
TEXTCODE:		0	321	321	321
KABELQUERSCHNITT	(mm2)	0	150	150	150
KABELBALLUNG	(ANZ.KABEL)	0	4	4	4
MITTELWERT	(A)	0	38	38	41
MAXIMALWERT	(A)	0	80	61	70
BELASTUNGSGRAD	(%)	0	48	63	60
ZULAESSIGER MAX.WERT	(A)		285	244	255
KABELAUSLASTUNG	(%)	0	28	25	27
00.15 UHR	(A)	0	21	15	18
00.45 UHR	(A)	0	21	15	12
01.15 UHR	(A)	0	12	15	12
22.15 UHR	(A)	0	30	30	37
22.45 UHR	(A)	0	25	30	41
23.15 UHR	(A)	0	21	21	38
23.45 UHR	(A)	0	25	15	30

Fig. 3
Numerische Darstellung aller pro Element gespeicherten Werte und der Auswertung nach VDE 0298

MESSDATUM:	(TAG.MONAT)	00.00	00.12	00.03	30.09
	(JAHR)	0	1976	1981	1982
	(WOCHENTAG)				DONN
TEXTCODE:		0	321	321	321
KABELQUERSCHNITT	(mm2)	0	150	150	150
KABELBALLUNG	(ANZ.KABEL)	0	4	4	4
MITTELWERT	(A)	0	38	38	41
MAXIMALWERT	(A)	0	80	61	70
BELASTUNGSGRAD	(%)	0	48	63	60
ZULAESSIGER MAX.WERT	(A)		285	244	255
KABELAUSLASTUNG	(%)	0	28	25	27

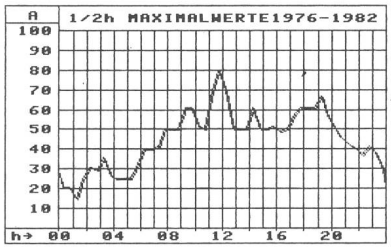

Fig. 4
Wichtigste Werte und Hüllkurve der gespeicherten Tageslastspiele

EW BIEL
NETZBETRIEB

LEITUNG 0.4 kV

STRANG-NR: S058-258(2)

BRUEGGSTRASSE SUEDLICH WESTSEITE
STRANG 2
VK 258 BRUEGGSTRASSE 78

LEITUNGSTYP: BLEIKABEL

MESSUNG:		12.76	3.81	9.82
STRICHART IM DIAGRAMM:				
TEXTCODE		321	321	321
QUERSCHNITT (in mm2)		150	150	150
KABELBALLUNG		4	4	4
MITTELWERT (in A)		38	38	41
MAXIMALWERT (in A)		80	61	70
%BELAST. GRAD		48	63	60
ZUL. MAX. WERT (in A)		285	244	255
%AUSLASTUNG		28	25	27

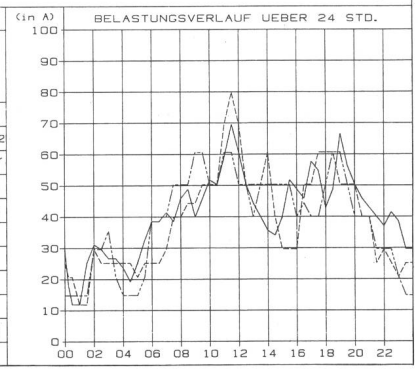

Fig. 5
Grafische Darstellung aller pro Element gespeicherten Tageslastspiele und numerische Darstellung der Auswertung

EW BIEL
NETZBETRIEB

LEITUNG 0.4 kV

STRANG-NR: S058-258(2)

BRUEGGSTRASSE SUEDLICH WESTSEITE
STRANG 2 VK 258 BRUEGGSTRASSE 78
MIT PROJEKTIERTER HEIZUNG +60KW

LEITUNGSTYP: BLEIKABEL

MESSUNG:	AELTESTE MESSUNG	2. MESSUNG	3. MESSUNG	NEUSTE MESSUNG
STRICHART IM DIAGRAMM:				
TEXTCODE				
QUERSCHNITT (in mm2)		150	150	150
KABELBALLUNG		4	4	4
MITTELWERT (in A)		98	98	100
MAXIMALWERT (in A)		158	139	150
%BELAST. GRAD		62	71	67
ZUL. MAX. WERT (in A)		248	225	235
%AUSLASTUNG		64	62	64

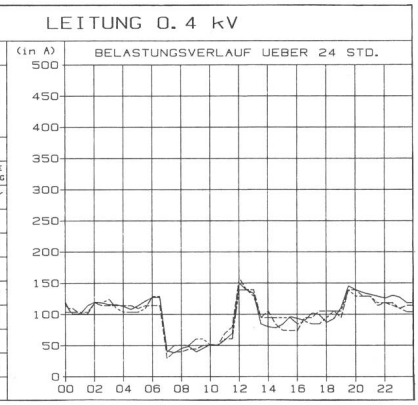

Fig. 6
Kabel wie in Figur 5, mit einer zusätzlichen Heizlast von 60 kW; die Freigabezeiten sind berücksichtigt

- Entscheidungsgrundlagen für allgemeine Projekte, Bewilligungen von Heizungen, Umschaltungen usw. sind in kürzester Zeit erarbeitet.
- Vorzeitiges Altern der Anlagen durch dauernde Überlast wird verhindert.
- Das Wissen ist nicht nur in den Köpfen von einzelnen, langjährigen Mitarbeitern gespeichert, sondern steht unter anderem auch deren Nachfolgern sofort zur Verfügung.

6. Beispiele der Auswertung

In den Figuren 1-6 sind Beispiele möglicher Auswertungen der Berechnungen dargestellt. Die dabei verwendeten Begriffe sind nachfolgend kurz definiert.

Adresse: Kurzbezeichnung und Suchbegriff für das einzelne Netzelement.

Belastungsgrad: Quotient aus Durchschnittslast und Grösstlast ×100%.

Eingeschaltete Trafoleistung: In einer Transformatorenstation eingeschaltete Transformatorenmessleistung.

Installierte Trafoleistung: In einer Transformatorenstation installierte Transformatorennennleistung.

Kabelballung: Anzahl Kabel, die im gleichen Graben verlegt sind.

Tageslastspiel: Verlauf der Last während 24 Stunden bei ungestörtem Betrieb.

Textcode: Code für bestimmte Bemerkungen, z.B.

3phasige Messung
Nur Transitbelastung
Nur Kabelbelastung

Zulässiger Maximalwert: Dieser Wert wird durch das Programm aufgrund der gespeicherten Betriebsdaten ermittelt. Er dient als Referenz für die thermische Belastung.

Maximalwert: Grösster gespeicherter Mittelwert über 30 Minuten pro Tageslastspiel.

Maximalwert: P (Trafo) (%): Quotient aus dem Maximalwert und der eingeschalteten Transformatorennennleistung × 100%.

Mittelwert: Linearer Mittelwert aus allen pro Tageslastspiel gespeicherten Belastungswerten.

Mittelwert: P (Trafo) (%): Quotient aus dem Mittelwert und der eingeschalteten Transformatorennennleistung × 100%.

Auslastung (%): Quotient aus dem Maximalwert und dem zulässigen Maximalwert × 100%.