

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: 77 (1986)

Heft: 5

Artikel: Transiente Kabelerwärmung bei zyklischer Belastung

Autor: Beyer, U.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904169>

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>

Transiente Kabelerwärmung bei zyklischer Belastung

U. Beyer

In einem zur Bestimmung transienter Kabelerwärmungen entwickelten Finite-Elemente-Verfahren wurde bisher von spontaner und irreversibler Bodenaustrocknung oberhalb einer vorzugebenden Grenzübertemperatur ausgegangen. Der zur Wasserverdampfung nötige Zeitbedarf wurde dabei vernachlässigt. Der Autor berichtet über eine Weiterentwicklung des Verfahrens, die eine Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung ermöglicht. Anschliessend werden resultierende Überlastbarkeiten von Hochleistungskabeln bei zyklischer Belastung vorgestellt.

Pour déterminer l'échauffement transitoire des câbles, on utilisait, jusqu'à présent, une méthode à éléments finis partant d'une dessiccation spontanée et irréversible du sol au-delà d'une température limite donnée, et cela en négligeant le temps nécessaire à l'évaporation de l'eau. L'auteur décrit un développement de ce procédé, qui tient compte d'un ralentissement de la dessiccation du sol, puis les possibilités de surcharge de câbles pour grandes puissances, dans le cas d'une charge cyclique.

Adresse des Autors

Dr. Ing. Uwe Beyer, Institut für Elektrische Energieübertragung, Universität Duisburg, Postfach 101629, D-4100 Duisburg 1.

1. Einleitung

In den letzten Jahren hat international die Diskussion eingesetzt, inwieweit Kabel überlastet werden dürfen. Während für Dauerlast die höchstzulässigen Temperaturen national und international festgelegt sind, wurden hinsichtlich von Überlastungen noch keine verbindlichen Festlegungen bezüglich der zulässigen Temperaturüberhöhungen und der dazugehörigen Zeitspannen getroffen. Da aber aufgrund des Prinzips der $(n-1)$ -Redundanz Hochleistungskabel in vielen Fällen im normalen Betrieb nicht vollständig ausgelastet werden, ergibt sich zwangsläufig die Möglichkeit zeitweiliger Überlastungen, ohne die dauernd zulässigen Leitertemperaturen zu überschreiten.

Es erhebt sich also die Frage, welche Überlastungen über welche Zeitspannen möglich sind, falls die betrachteten Kabel vor der Überlastung unterhalb der zulässigen Dauertemperaturen betrieben worden sind.

Diese Frage bedingt, dass die thermischen Widerstände und Wärmekapazitäten des Kabels einschliesslich seiner Umgebung erfasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es oberhalb einer Grenztemperatur zur Bodenaustrocknung und damit zu einer Veränderung der thermischen Eigenschaften des Erdbodens kommt. Da eine Temperaturmessung der auf Hochspannungspotential befindlichen Kabelleiter schwierig, wenn nicht sogar ausgeschlossen ist, verbleibt nur die Möglichkeit einer rechnerischen Abschätzung der in thermisch ungünstigen Trassenabschnitten zu erwartenden Kabelerwärmungen.

Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes wurde ein zweidimensionales Finite-Elemente-Verfahren entwickelt, mit dem nicht nur stationäre, sondern auch transiente Kabelerwärmungen unter Berücksichtigung

möglicher Bodenaustrocknung berechnet werden können [1; 2; 3; 4]. Bei diesem Berechnungsverfahren wurde bisher vereinfachend spontane irreversible Bodenaustrocknung angenommen. Der zur Austrocknung nötige Zeitbedarf wurde dabei vernachlässigt. Inzwischen ist es gelungen, das Berechnungsverfahren so zu verbessern, dass es eine Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung ermöglicht. Im folgenden wird darüber berichtet.

2. Beschreibung der zur Bodenaustrocknung führenden thermisch-hydrologischen Vorgänge

Erdböden bestehen aus festen Partikeln unterschiedlicher Korngrößen und Zwischenräumen, die mit Wasser, Wasserdampf und Luft gefüllt sind (Fig. 1). Das Wasser umhüllt die Parti-

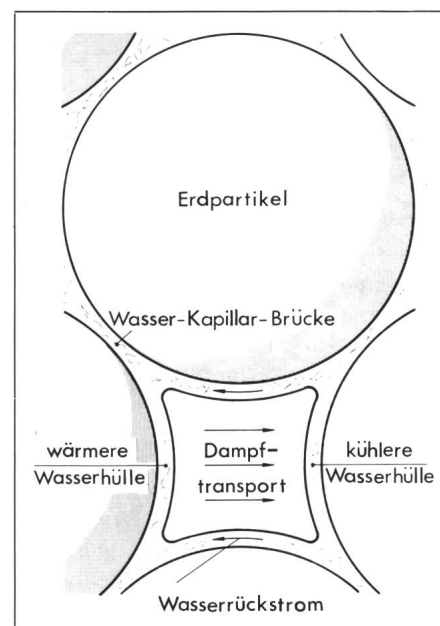


Fig. 1 Schematische Darstellung einiger feuchter Erdpartikel bei Vorhandensein eines Temperaturgradienten

kel, und die Wasserhüllen berühren sich gegenseitig, wobei sich sogenannte Wasserkapillarbrücken ausbilden. Wenn man von Schwerkrafteffekten absieht, kommt es in isothermen Erdböden aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers zu einer gleichmäßigen Feuchteverteilung.

Ein Temperaturgradient im Erdbo- den führt dazu, dass sich Wasserober- flächen unterschiedlicher Temperatur gegenüberstehen. Aufgrund des damit verbundenen Dampfdruckgefälles kommt es daher zu einem Wasserdampftransport in Richtung des Tem- peraturgefälles. Durch Kapillartrans- port kann das Wasser zurückfließen. Allerdings stellen sich u.a. aufgrund von Fließwiderständen Gradienten des Feuchtegehaltes ein. Bei Vernach- lässigung von Schwerkrafteffekten kann davon ausgegangen werden, dass eine sich ausbildende stationäre Feuchteverteilung der sie hervorrufen- den Temperaturverteilung ähnlich ist, d.h. Isothermen sind auch Linien glei- cher Feuchte.

Wird bei ansteigenden Kabelerwär- mungen in einer Erdschicht eine kriti- sche Grenzübertemperatur erreicht, so kommt es durch den abnehmenden Feuchtegehalt zu einem Abriss der Wasser-Kapillar-Brücken. Dadurch wird der Wasserrückstrom unterbro- chen, und die entsprechende Erd- schicht trocknet durch den zunächst noch anhaltenden Wasserdampftrans- port aus. Wie Versuche [5] gezeigt ha- ben, ist eine Rückfeuchtung einmal ausgetrockneter Erdschichten erst möglich, wenn kein Temperaturgefälle mehr besteht, das einer Rückfeuch- tung entgegenwirkt.

3. Berücksichtigung des zur Bodenaustrocknung nötigen Zeitbedarfes

Die beschriebenen Austrocknungs- vorgänge wurden im bisherigen Finite- Elemente-Verfahren vereinfacht da- durch berücksichtigt, dass oberhalb einer Grenzerwärmung spontane, irre- versible Bodenaustrocknung ange- nommen wurde. Die im folgenden vorgestellte Überlegung geht davon aus, dass zur Austrocknung der die Erdpartikel benetzenden Wasserhül- len Verdampfungswärme nötig ist. Der zur Austrocknung nötige Zeitbedarf wird daher von der Bereitstellung der Verdampfungswärme, d.h. von der vorhandenen Wärmestromdichte be- stimmt.

Mit dem Massenstrom des Wasser- dampfes ist über die in den Wassermole- külen gespeicherte Wärmemenge ein Wärmetransport verbunden. Daher kann die maximal aus einem Volumen- element abtransportierte Wassermen- ge aus dem vorliegenden Wärmestrom und dem spezifischen Energieinhalt des Wasserdampfes abgeschätzt und, wie im folgenden gezeigt, in einem Feldberechnungsverfahren berück- sichtigt werden.

Bei dem Finite-Elemente-Verfahren nach [4] wird ein Trassenquerschnitt durch dreieckige Elemente nachgebil- det (Fig. 2), wobei innerhalb jedes Ele- mentes von homogenen, isotropen thermischen Eigenschaften und linear ortsabhängiger Temperaturverteilung ausgegangen wird. Die Temperatur- verteilung innerhalb eines Elementes bestimmt sich durch Interpolation aus den zu berechnenden Temperaturver- läufen der bei der Finite-Elemente- Nachbildung entstehenden Netzkno- ten:

$$\vec{\vartheta}(x, y, t) = \vec{N}^T(x, y) \cdot \vec{\vartheta}_K(t) \quad (1)$$

$\vec{\vartheta}(x, y, t)$ orts- und zeitabhängige Tempe-
ratur im Dreieck,
 $\vec{N}^T(x, y)$ transformierter Formfunktions-
vektor zur Berücksichtigung der
Ortsabhängigkeit der Tempe-
raturverteilung und
 $\vec{\vartheta}_K(t)$ Vektor der Knotentemperaturen
des Elementes.

Der Formfunktionsvektor für ein fi-
nites Dreieck lautet bei einem linearen
Ansatz für die Temperaturverteilung

$$\vec{N} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} (y_2 - y_3)(x - x_2) + (x_3 - x_2)(y - y_2) \\ (y_3 - y_1)(x - x_3) + (x_1 - x_3)(y - y_3) \\ (y_1 - y_2)(x - x_1) + (x_2 - x_1)(y - y_1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

wobei x_i, y_i die Koordinaten der Ele-
mentknoten sind und die Jakobi-
Determinante J den doppelten Flä-
cheninhalt des Dreiecks bildet:

$$J = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1) \quad (3)$$

Durch Anwendung der Finite-Ele-
mente-Theorie ergibt sich ein Glei-
chungssystem zur Bestimmung von
stationären Temperaturverteilungen
(Ausgangsverteilung)

$$[K] \vec{\vartheta} + \vec{f} = 0 \quad (4)$$

und ein weiteres zur schrittweisen Er-
mittlung von thermischen Transient-
vorgängen:

$$\left([C] + \frac{1}{2} \Delta t [K] \right) \vec{\vartheta}_{n+1} = \left([C] - \frac{1}{2} \Delta t [K] \right) \vec{\vartheta}_n - \frac{1}{2} \Delta t (\vec{f}_n + \vec{f}_{n+1}) \quad (5)$$

$[K]$ Konduktivitätsmatrix
 \vec{f} Erregungsvektor
 $[C]$ Kapazitätsmatrix
 Δt diskrete Zeitschrittweite

Ausgehend von einer bereits be-
kannten Temperaturverteilung $\vec{\vartheta}_n$
eines Zeitpunktes t_n wird durch Lö-
sung von Gl. (5) eine Temperaturver-
teilung $\vec{\vartheta}_{n+1}$ zum Zeitpunkt $t_{n+1} = t_n +$
 Δt gewonnen.

Bei dem neuen Verfahren wird zur
Bestimmung von stationären
Ausgangstemperaturverteilungen das
bisherige Modell angewendet, das zur
Festlegung der thermischen Leitfähig-
keit und Wärmekapazität des Erdbo-
dens von einem Zweischichtenmodell
(feucht/trocken) ausgeht:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_F \text{ für } \vartheta \leq \vartheta_G \\ \lambda_T \text{ für } \vartheta > \vartheta_G \end{cases} \quad (6)$$

$$(c\varrho) = \begin{cases} (c\varrho)_F \text{ für } \vartheta \leq \vartheta_G \\ (c\varrho)_T \text{ für } \vartheta > \vartheta_G \end{cases} \quad (7)$$

λ thermische Leitfähigkeit
 $(c\varrho)$ flächenbezogene Wärmekapazität

Bei der Nachbildung von transien-
ten Austrocknungsvorgängen wird die
Wärmekapazität eines Elementes, des-
sen Temperatur über die kritische
Grenztemperatur ϑ_G wächst, schritt-
weise um den Betrag vermindert, der
sich aus dem abgeschätzten Dampf-
umsatz während des zurückliegenden
diskreten Zeitschrittes ergibt. Die ther-
mische Leitfähigkeit wird analog zu
der geänderten Wärmekapazität nach-
geführt.

Der in einem gerade austrocknen-
den Element vorhandene Temperatur-
gradient besitzt die Komponenten

$$\frac{\delta \vartheta}{\delta x} = (y_2 - y_3) \vartheta_1 + (y_3 - y_1) \vartheta_2 + (y_1 - y_2) \vartheta_3 \quad (8)$$

$$\frac{\delta \vartheta}{\delta y} = (x_3 - x_2) \vartheta_1 + (x_1 - x_3) \vartheta_2 + (x_2 - x_1) \vartheta_3 \quad (9)$$

Der aufgrund der thermischen Leit-
fähigkeit und des Temperaturgradien-
ten durch das Element transportierte
Wärmestrom ergibt sich zu

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\delta g}{\delta x} (y_j - y_i) - \frac{\delta g}{\delta y} (x_j - x_i) \right|$$

$$j = 1 + \text{mod}(i, 3) \quad (10)$$

Die Abschätzung des maximalen Wasserverlustes erfolgt durch die Annahme, dass dieser Wärmestrom während eines Zeitabschnittes Δt vollständig in Form von Wasserdampf weitertransportiert wird, wobei sicherheits halber nur die Verdampfungswärme berücksichtigt wird. Die während eines Zeitschrittes maximal mögliche Verringerung der flächenbezogenen Wärmekapazität eines Elementes berechnet sich dann zu

$$\left| \Delta(c_p) \right| \leq \frac{2 c_w \dot{Q} \Delta t}{r_w J} \quad (11)$$

c_w Wärmekapazität von Wasser
 r_w Verdampfungswärme von Wasser

Bei der Verminderung der Wärmekapazität und der thermischen Leitfähigkeit des Erdbodens ist zu berücksichtigen, dass diese sich nur innerhalb gewisser Grenzen ändern können, und zwar innerhalb der Grenzen, die durch feuchten bzw. ausgetrockneten Erdboden bestimmt werden. Ausserdem ist darauf zu achten, dass sich die Grenz isotherme für Bodenaustrocknung nicht weiter als bei spontaner Bodenaustrocknung ausdehnen kann. Der Feuchtegehalt der Erdelemente kann somit implizit über die jedem Element zugeordnete, flächenbezogene Wärmekapazität nachgebildet werden, wobei es sich erübrigt, zusätzlichen Speicherplatz für die Berücksichtigung des aktuellen Feuchtegehaltes bereitzustellen. Im Programmablauf werden die Wärmekapazitäten und thermischen Leitfähigkeiten der Erdelemente nach jedem Zeitschritt aktualisiert. Rückfeuchtung wird auch nach einer längeren Abkühlung nicht zugelassen.

Wie ein Vergleich mit Messergebnissen zeigte, simuliert eine derartige Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung nur knapp die Hälfte der in Wirklichkeit auftretenden Zeitverzögerung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der durch Wasserkapillart transport mögliche Wasserrückstrom vernachlässigt wird und dass ein vorhandener Temperaturgradient nicht nur Dampftransport, sondern auch Wärmeleitung zur Folge hat. Der Vorteil des vorliegenden Berechnungsverfahrens besteht jedoch darin, dass es ohne Kenntnis von erdbodenabhängigen Diffusionskoeffizienten auskommt und Überlastbarkeiten liefert, die un-

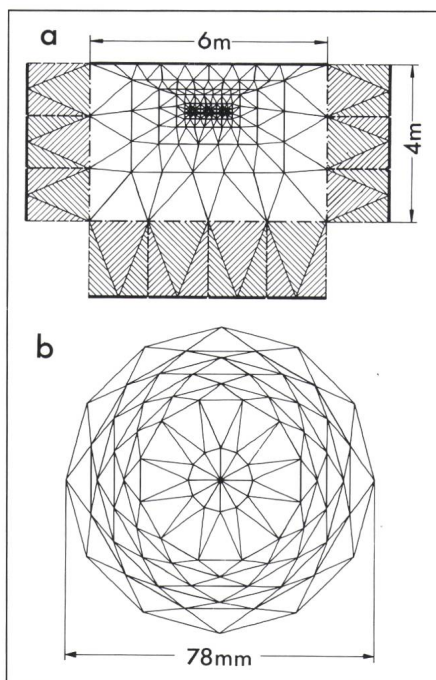


Fig. 2 Finite-Elemente-Anordnung zur Nachbildung eines Trassenquerschnittes

- a Erdboden mit zusätzlichen Randelementen (schraffiert) zur Steuerung der Temperaturen auf den strichpunktierten Rändern
 --- kein Wärmedurchgang
 b Kabelader (vergrössert herausgezeichnet)

bedingt auf der sicheren Seite liegen. Mit diesem verbesserten Verfahren berechnen sich die gleichen stationären Anfangs- und End-Temperaturverteilungen wie bei Annahme spontaner Bodenaustrocknung.

4. Transiente Kabelerwärmungen bei Belastungsverdopplung

4.1 Einfacher Lastsprung

In [4] wurden Hochleistungskabel (Ölpapier- und VPE-Kabel) unter-

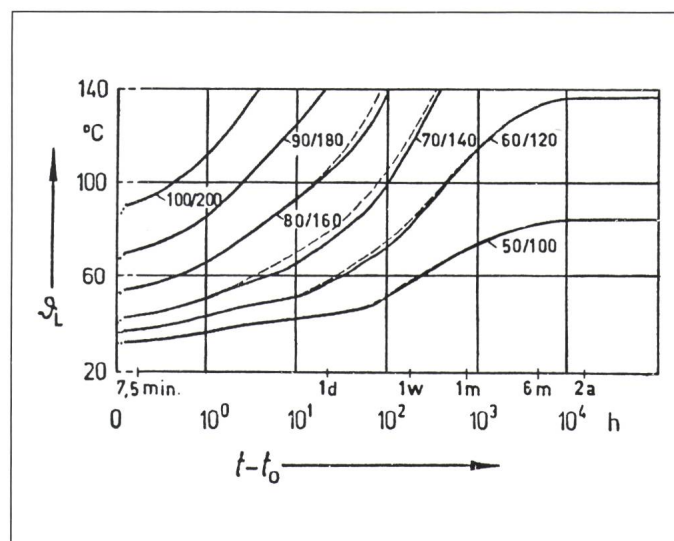
schiedlicher Spannungsebenen (110, 220, 380 kV) hinsichtlich ihrer Überlastbarkeiten bei Verdopplung analysiert. Dabei wurde zum einen der Fall eines in normalem Erdboden verlegten Kabels berücksichtigt und zum anderen der Fall eines in einem bereichsweise thermisch stabilisierten Trassenquerschnitt (Magerbeton) verlegten Kabels betrachtet. Unter Annahme spontaner irreversibler Bodenaustrocknung berechneten sich bei einer Lastverdopplung nach einer vorausgegangenen Belastung mit 60% der Dauerbelastbarkeit Überlastbarkeitszeitspannen zwischen 7 und 11 Tagen. Die geringste Überlastbarkeit ergab sich bei einem in thermisch uninstabilisiertem Erdboden verlegten 110-kV-Ölpapierkabel. Dabei wurden als oberste Temperaturgrenzen die gültigen, höchstzulässigen Dauertemperaturen vorausgesetzt.

Die technischen Daten der berechneten Kabelanlage gibt Tabelle I an. Figur 2 zeigt die zu einer Nachbildung des Trassenquerschnittes verwendeten finiten Elemente. Im folgenden wird für diese Kabelanlage ein Vergleich von Kabelerwärmungen vorgenommen, die mit und ohne Berücksichtigung der Zeitverzögerung bei Bodenaustrocknung berechnet wurden. Ausgehend von einem anfänglichen Auslastungsgrad werden die Kabelerwärmungen untersucht, die sich nach einer Belastungsverdopplung einstellen.

In Figur 3 sind die unter Berücksichtigung zeitverzögerter Bodenaustrocknung berechneten Leitertemperaturverläufe durchgezogen und die unter Berücksichtigung spontaner Bodenaus-

Fig. 3 Leitertemperaturverläufe eines in thermisch uninstabilisiertes Rückfüllmaterial gebetteten 110-kV-Ölpapierkabels bei Lastverdopplung

Parameter ist das Verhältnis der prozentualen Auslastung (bezogen auf die Dauerbelastbarkeit) vor und nach der Laständerung
 --- berechnet unter Annahme spontan (oberhalb 35 °C) auftretender Bodenaustrocknung
 — bei Berücksichtigung zeitverzögerter Bodenaustrocknung



Kupfersegmentleiter	max. Leitertemperatur	85 °C
	Leiterquerschnitt	1000 mm ²
	Füllfaktor	0,85
	Ölkalandurchmesser	16 mm
	Leiterwandstärke	13 mm
Ölpapierisolierung	elektrische Leitfähigkeit	57 m/Ωmm
	Temperaturkoeffizient el. Widerstand	0,0039 /K
	thermische Leitfähigkeit	395 W/K m
	spezifische Wärmekapazität	3,47 Ws/cm ³ K
	Dicke	10 mm
Bleimantel	Dielektrizitätszahl	3,6
	Verlustfaktor	0,0025
	thermische Leitfähigkeit	0,2 W/K m
	spezifische Wärmekapazität	2,27 Ws/cm ³ K
	thermische Leitfähigkeit von Öl	0,14 W/K m
Korrosionsschutz	spezifische Wärmekapazität von Öl	1,50 Ws/cm ³ K
	Wanddicke	2,7 mm
	thermische Leitfähigkeit	34 W/K m
	spezifische Wärmekapazität	1,48 Ws/cm ³ K
	Mantelverlustfaktor	0,1
Verlegung	Dicke	5 mm
	thermische Leitfähigkeit	0,167 W/K m
	spezifische Wärmekapazität	1,64 Ws/cm ³ K
	Verlegetiefe	1,2 m
	Achsabstand	0,4 m
Erdboden	thermische Leitfähigkeit, feucht	1,0 W/K m
	thermische Leitfähigkeit, trocken	0,4 W/K m
	Wärmekapazität, feucht	2,00 Ws/cm ³ K
	Wärmekapazität, trocken	1,40 Ws/cm ³ K
	Grenztemperatur Bodenaustrocknung	35 °C
	Umgebungstemperatur	20 °C

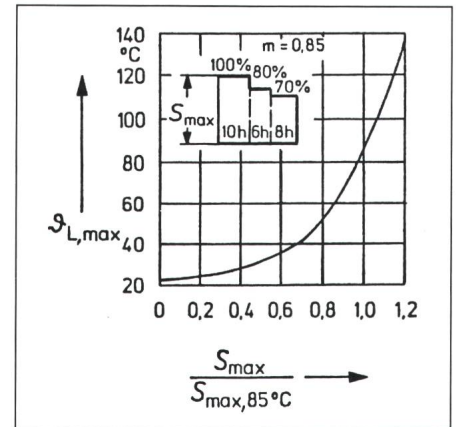


Fig. 4 Tageshöchst-Leitertemperatur eines 110-kV-Ölpapierkabels (Tab. I) bei zyklischem Tageslastverlauf in Abhängigkeit des Auslastungsgrades $m = 0,85$ Belastungsgrad, mittlere Übertragungsleistung bezogen auf die tägliche Spitzenleistung

Bei einer Dauerlastverdopplung von 60% auf 120% der Dauerbelastbarkeit berechnet sich unter Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung eine Überlastbarkeitszeitspanne, die mit 8,7 Tagen um 24 h länger als bei spontaner Bodenaustrocknung ist. Bei einer Lastverdopplung von 70% auf 140% vergrößert sich diese Zeitspanne von 1,4 auf 1,9 Tage.

trocknung berechneten Leitertemperaturverläufe gestrichelt (über logarithmisch geteilter Zeitachse) aufgetragen. Bei Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung werden Ausbreitungsvorgänge von Austrocknungszonen im Trassenquerschnitt langsamer als bei spontaner Bodenaustrocknung stattfinden. Daher werden zeitweilig höhere thermische Leitfähigkeiten und Wärmekapazitäten auftreten, woraus geringere Leitertemperaturen resultieren.

Die bei diesen Annahmen zulässige Überlastbarkeitsdauer ergibt sich mit Erreichen der zulässigen Dauerlasttemperatur von 85 °C. Es zeigt sich, dass bei einer Berücksichtigung zeitverzögerter Bodenaustrocknung in einigen Fällen Überlastbarkeitssteigerungen auftreten, dies immer dann, wenn während der Überlastung eine Ausweitung der Austrocknungszone erfolgt. Bei höheren Ausgangsbelastungen (von 80% der Belastbarkeit und mehr) sind die Überlastbarkeitszeitspannen so kurz, dass der von den Kabeln ausgehende Erwärmungsvorgang den Rand der Austrocknungszone nicht erreicht, so dass unveränderte Überlastbarkeiten festgestellt werden.

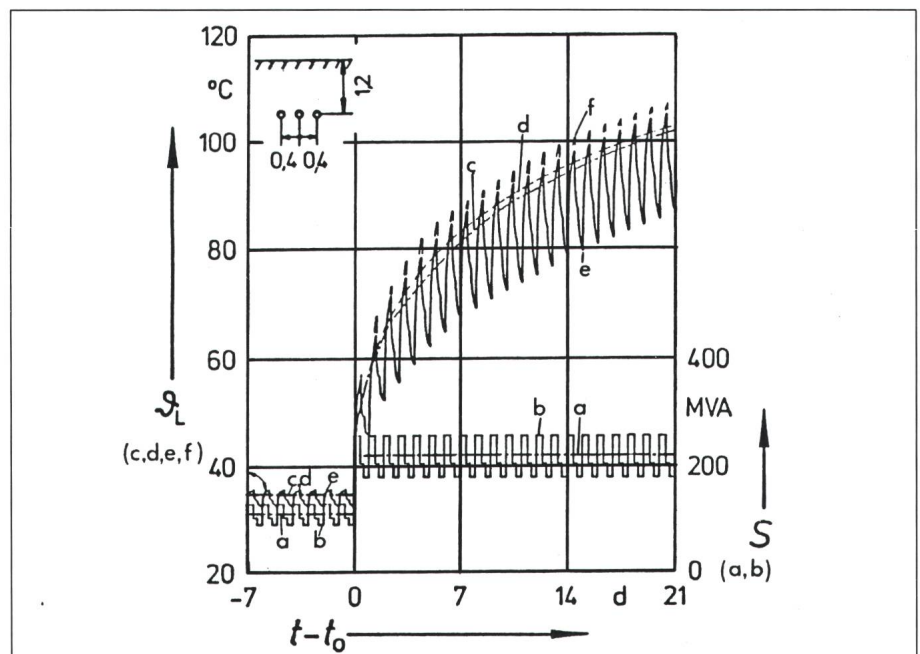


Fig. 5 Übertragungsleistung und resultierender Leitertemperaturverlauf eines 110-kV-Ölpapierkabels (Tab. I) bei einer Lastverdopplung von 60% auf 120% der Belastbarkeit

- a Übertragungsleistung bei Dauerlastsprung
- b Übertragungsleistung bei dynamischer Lastverdopplung
- c Leitertemperaturverlauf bei Dauerlastsprung unter Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung
- d Leitertemperaturverlauf bei Dauerlastsprung unter Berücksichtigung spontaner Bodenaustrocknung
- e Leitertemperaturverlauf bei dynamischer Lastverdopplung unter Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung
- f Leitertemperaturspitzen bei dynamischer Lastverdopplung unter Berücksichtigung spontaner Bodenaustrocknung

4.2 Lastverdopplung bei zyklischer Last

Im weiteren werden die Überlastbarkeiten der gleichen Kabelanlage (Tab. I) bei zyklischem Tageslastverlauf untersucht. Die Überlastbarkeitsdauer ist wiederum eine Funktion des anfänglichen Auslastungsgrades der Kabelanlage. In Figur 4 ist die jeweils höchste Tagestemperatur in Abhängigkeit des Auslastungsgrades dargestellt.

Nachdem das Kabel über einen langen Zeitraum mit gleichen Tageslastzyklen beansprucht wurde, kommt es durch eine Abschaltung eines parallelen Betriebsmittels für das betrachtete Kabel zu einer Lastverdopplung. Der für zyklische Lastverdopplung unter Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung berechnete Leitertemperaturverlauf ist in Figur 5 als dick durchgezogene Kennlinie (e) über linearem Zeitmassstab dargestellt. Von dem für spontane Bodenaustrocknung und zyklische Lastverdopplung be-

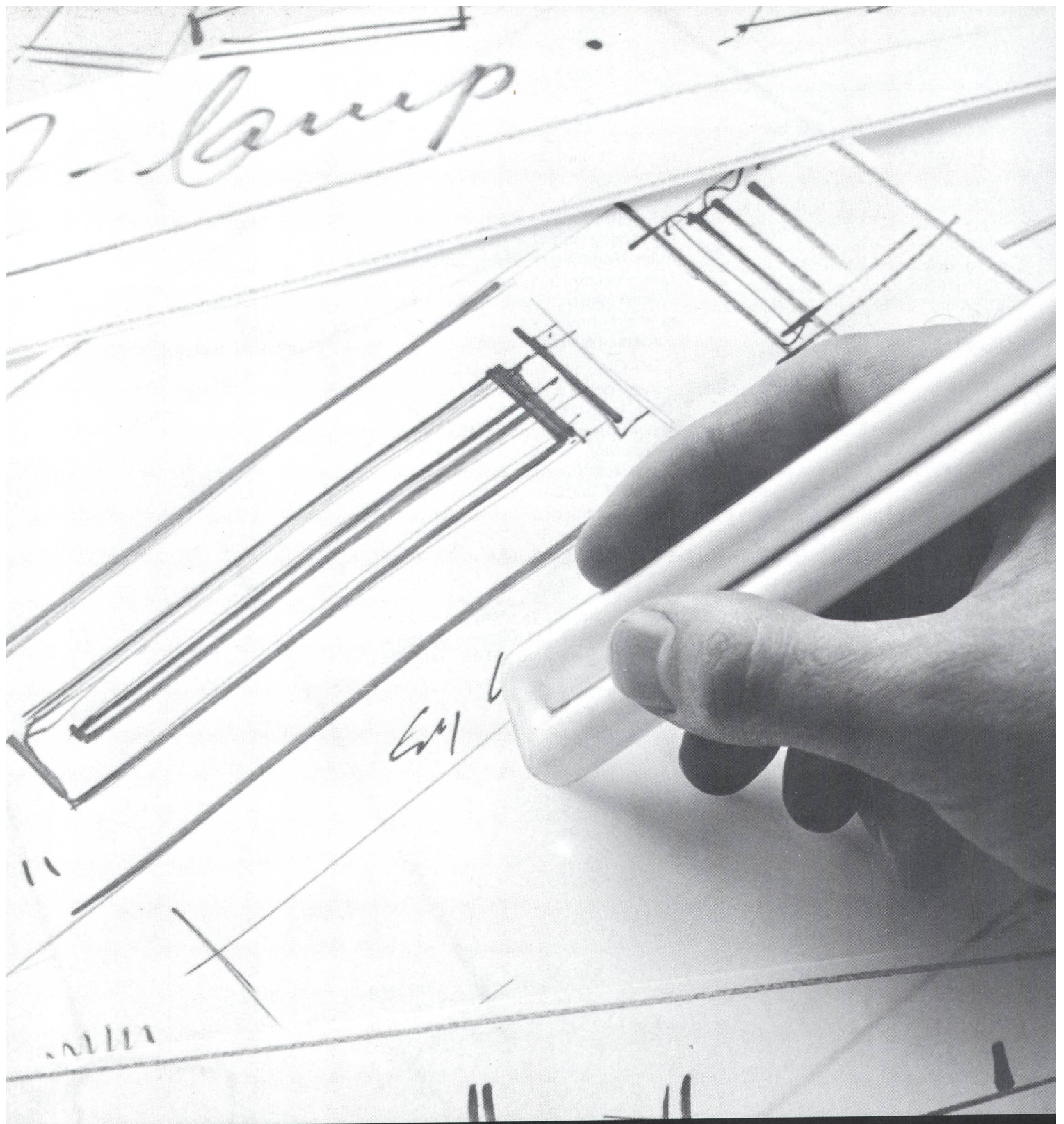
rechneten Temperaturverlauf wurden nur die Temperaturspitzen (f) eingetragen. Bei einer zyklischen Lastverdopplung von 60% auf 120% ergibt sich aufgrund verzögerter Bodenaustrocknung mit 7,4 Tagen eine um einen Tag längere Überlastbarkeitsdauer. Bei einem Sprung von 70% auf 140% ergibt sich dagegen keine spürbare Erhöhung der zyklischen Überlastbarkeitsdauer (1,4 Tage).

Die Figur 5 erlaubt eine Gegenüberstellung der Überlastbarkeit bei zyklischem Lastverlauf und bei Dauerlastverlauf mit und ohne Austrocknungsverzögerung. Die strichpunktierte Linie (c) steht für einen Temperaturverlauf bei Dauerlastverdopplung mit Berücksichtigung der Austrocknungsverzögerung, wohingegen die gestrichelte Linie (d) die Austrocknungsverzögerung bei einer Dauerlastverdopplung nicht berücksichtigt. Es wird ersichtlich, dass die für spontane Bodenaustrocknung und Dauerlastverdopplung berechneten Kabelerwärmungen die

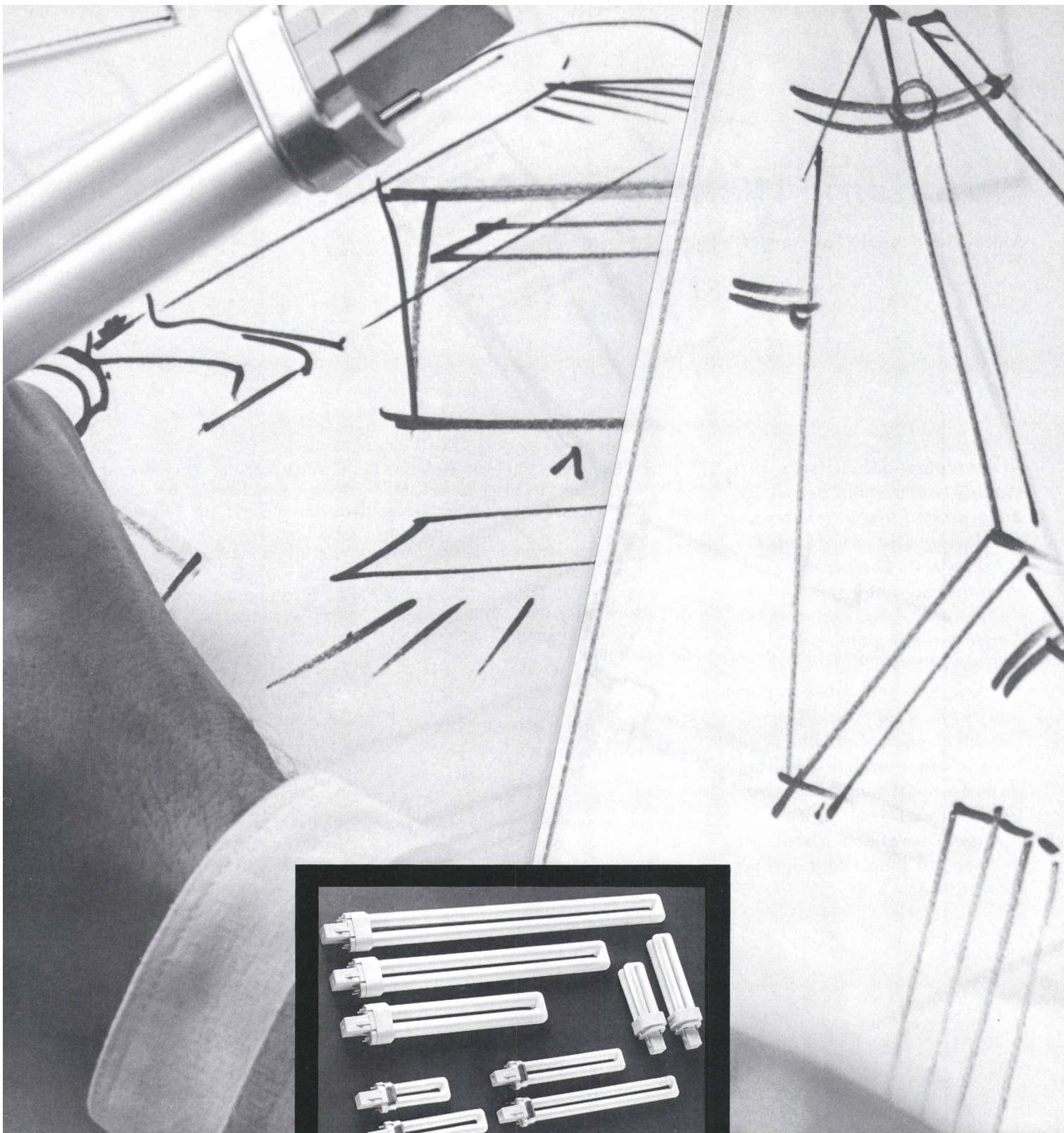
für Überlastung bei zyklischen Lastverläufen unter Berücksichtigung verzögerter Bodenaustrocknung ermittelten Leitertemperaturspitzen recht gut annähern. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die in [4] für unterschiedliche Spannungsebenen, Kabeltypen und Grabenrückfüllmaterialien berechneten Überlastbarkeiten unverändert auch als Überlastbarkeiten bei zyklischen Lastverläufen anzunehmen.

Literatur

- [1] U. Beyer: Berechnung transienter Kabelerwärmungen. *Elektrizitätswirtsch.* 83(1984)26, S. 1114...1117.
- [2] U. Beyer und M. Tippmann: Verstärkung einer 110-kV-Kabelanlage durch VPE-Kabel und resultierende Überlastbarkeiten. *Elektrizitätswirtsch.* 84(1985)7, S. 234...240.
- [3] U. Beyer: Transiente Erwärmung eines leitergekühlten Hochleistungskabels. *ETZ* 106(1985)21, S. 1150...1153.
- [4] U. Beyer: Berechnung transienter Kabelerwärmungen unter Berücksichtigung möglicher Bodenaustrocknung. Dissertation der Universität -GH- Duisburg, 1985.
- [5] D. Highgate and R. Parr: A note on cable ratings and moisture recovery during cyclic loading conditions. Paper for Kema-Workshop. Arnhem, 11...13 September 1984.



**Diese Lampe bestimmt
den Leuchten-Stil von morgen.**



Lynx

Energiesparende Kompakt-Leuchtstofflampen mit breitem Einsatzspektrum.

Mit den neuen Lynx Kompakt-Leuchtstofflampen von Sylvania bietet sich die seltene Gelegenheit, völlig neuartige Leuchten zu entwickeln, anzubieten oder zu gebrauchen. Leuchten, die ästhetisch **und** funktionell überzeugen und die im Stromverbrauch den Anforderungen der Zukunft gerecht werden.

Kompakt, flach und äusserst sparsam im Stromverbrauch, verbessern sie die Lichtausbeute gegenüber herkömmlichen Glühbirnen um das Vierfache – und ihre Lebensdauer ist fünfmal länger.

Für die vielen Einsatzbereiche dieses Lampentyps finden Sie in der Lynx-Familie 3 unterschiedliche Sorten:

Lynx-S (5W, 7W, 9W, 11W): für Tisch- und Büroleuchten, für Wand- und Deckenleuchten, innen und aussen, für Sicherheitsleuchten und Ähnliches.

Lynx-D (10W, 13W): für versenkte oder tiefhängende Deckenleuchten, für Tisch- und Stehlampen, im Wohnbereich überall dort, wo normale Glühbirnen ersetzt werden können.

Lynx-L (18W, 24W, 36W): für den Arbeits- und den kommerziellen Bereich in

Büros, Werkstätten und Läden. Dort wo ständig das Licht brennt und wo mit relativ kleinen Leuchten optimale Lichtverhältnisse geschaffen werden müssen.

Wer heute an die Leuchten von morgen denkt, weiss wie wichtig Stromeinsparung, Funktionalität und Ästhetik sind. Mit der Lynx von Sylvania hat er die richtigen Voraussetzungen.

SYLVANIA

GTE

Gutes Licht. Besseres Licht.