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: 09.12.2025

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 dazugehörenden 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-

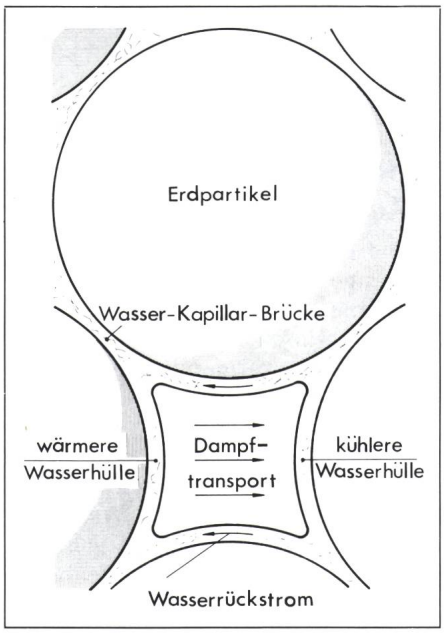


Fig. 1 Schematische Darstellung einiger feuchter Erdpartikel bei Vorhandensein eines Temperaturgradienten

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 Erdboden führt dazu, dass sich Wasseroberflächen unterschiedlicher Temperatur gegenüberstehen. Aufgrund des damit verbundenen Dampfdruckgefälles kommt es daher zu einem Wasserdampftransport in Richtung des Temperaturgefälles. Durch Kapillartransport kann das Wasser zurückfliessen. Allerdings stellen sich u.a. aufgrund von Fliesswiderständen Gradienten des Feuchtegehaltes ein. Bei Vernachlässigung von Schwerkrafteffekten kann davon ausgegangen werden, dass eine sich ausbildende stationäre Feuchteverteilung der sie hervorrufenden Temperaturverteilung ähnlich ist, d.h. Isothermen sind auch Linien gleicher Feuchte.

Wird bei ansteigenden Kabelerwärmungen in einer Erdschicht eine kritische Grenzübertemperatur erreicht, so kommt es durch den abnehmenden Feuchtegehalt zu einem Abriss der Wasser-Kapillar-Brücken. Dadurch wird der Wasserrückstrom unterbrochen, und die entsprechende Erdschicht trocknet durch den zunächst noch anhaltenden Wasserdampftransport aus. Wie Versuche [5] gezeigt haben, ist eine Rückfeuchtung einmal ausgetrockneter Erdschichten erst möglich, wenn kein Temperaturgefälle mehr besteht, das einer Rückfeuchtung entgegenwirkt.

3. Berücksichtigung des zur Bodenaustrocknung nötigen Zeitbedarfes

Die beschriebenen Austrocknungsvorgänge wurden im bisherigen Finite-Elemente-Verfahren vereinfacht dadurch berücksichtigt, dass oberhalb einer Grenzerwärmung spontane, irreversible Bodenaustrocknung angenommen wurde. Die im folgenden vorgestellte Überlegung geht davon aus, dass zur Austrocknung der die Erdpartikel benetzenden Wasserhüllen Verdampfungswärme nötig ist. Der zur Austrocknung nötige Zeitbedarf wird daher von der Bereitstellung der Verdampfungswärme, d.h. von der vorhandenen Wärmestromdichte bestimmt.

Mit dem Massenstrom des Wasserdampfes ist über die in den Wassermolekülen gespeicherte Wärmemenge ein Wärmetransport verbunden. Daher kann die maximal aus einem Volumenelement abtransportierte Wassermenge aus dem vorliegenden Wärmestrom und dem spezifischen Energieinhalt des Wasserdampfes abgeschätzt und, wie im folgenden gezeigt, in einem Feldberechnungsverfahren berücksichtigt werden.

Bei dem Finite-Elemente-Verfahren nach [4] wird ein Trassenquerschnitt durch dreieckige Elemente nachgebildet (Fig. 2), wobei innerhalb jedes Elementes von homogenen, isotropen thermischen Eigenschaften und linear ortsabhängiger Temperaturverteilung ausgegangen wird. Die Temperaturverteilung innerhalb eines Elementes bestimmt sich durch Interpolation aus den zu berechnenden Temperaturverläufen der bei der Finite-Elemente-Nachbildung entstehenden Netzknoten:

$$\vec{\vartheta}\,(x, y, t) = \vec{N}^{\mathrm{T}}(x, y) \cdot \vec{\vartheta}_{\mathrm{K}}(t) \qquad (1)$$

$\vec{\vartheta}\,(x, y, t)$ orts- und zeitabhängige Temperatur im Dreieck,
$\vec{N}^{\mathrm{T}}(x, y)$ transformierter Formfunktionsvektor zur Berücksichtigung der Ortsabhängigkeit der Temperaturverteilung und
$\vec{\vartheta}_{\mathrm{K}}(t)$ Vektor der Knotentemperaturen des Elementes.

Der Formfunktionsvektor für ein finites Dreieck lautet bei einem linearen Ansatz für die Temperaturverteilung

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

wobei x_i, y_i die Koordinaten der Elementknoten sind und die Jakobi-Determinante J den doppelten Flächeninhalt des Dreiecks bildet:

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

Durch Anwendung der Finite-Elemente-Theorie ergibt sich ein Gleichungssystem zur Bestimmung von stationären Temperaturverteilungen (Ausgangsverteilung)

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

und ein weiteres zur schrittweisen Ermittlung von thermischen Transientvorgängen:

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

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

Ausgehend von einer bereits bekannten Temperaturverteilung $\vec{\vartheta}_n$ eines Zeitpunktes t_n wird durch Lösung von Gl. (5) eine Temperaturverteilung $\vec{\vartheta}_{n+1}$ zum Zeitpunkt $t_{n+1} = t_n + \mathrm{d}t$ gewonnen.

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

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{\mathrm{F}} \text{ für } \vartheta \leqslant \vartheta_{\mathrm{G}} \\ \lambda_{\mathrm{T}} \text{ für } \vartheta > \vartheta_{\mathrm{G}} \end{cases} \qquad (6)$$

$$(c\varrho) = \begin{cases} (c\varrho)_{\mathrm{F}} \text{ für } \vartheta \leqslant \vartheta_{\mathrm{G}} \\ (c\varrho)_{\mathrm{T}} \text{ für } \vartheta > \vartheta_{\mathrm{G}} \end{cases} \qquad (7)$$

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

Bei der Nachbildung von transienten Austrocknungsvorgängen wird die Wärmekapazität eines Elementes, dessen Temperatur über die kritische Grenztemperatur ϑ_{G} wächst, schrittweise um den Betrag vermindert, der sich aus dem abgeschätzten Dampfumsatz während des zurückliegenden diskreten Zeitschrittes ergibt. Die thermische Leitfähigkeit wird analog zu der geänderten Wärmekapazität nachgeführt.

Der in einem gerade austrocknenden Element vorhandene Temperaturgradient besitzt die Komponenten

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

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

Der aufgrund der thermischen Leitfähigkeit und des Temperaturgradienten durch das Element transportierte Wärmestrom ergibt sich zu

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

$$j = 1 + \mathrm{mod}(i, 3) \qquad (10)$$

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

$$\left| \Delta(c\varrho) \right| \leqslant \frac{2\, c_w \dot{Q} \Delta t}{r_w J} \qquad (11)$$

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

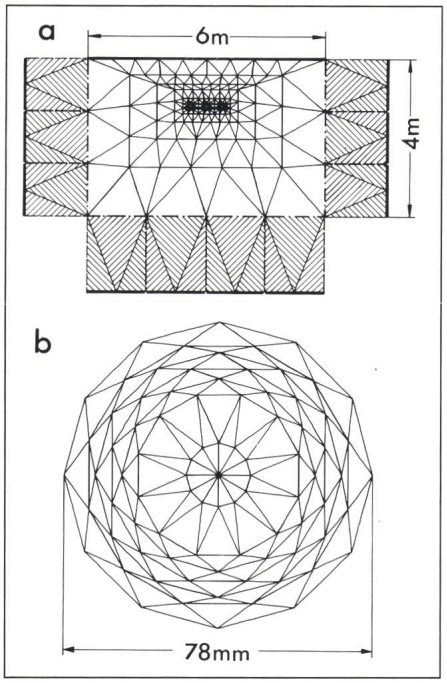


Fig. 2 Finite-Elemente-Anordnung zur Nachbildung eines Trassenquerschnittes

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

4. Transiente Kabelerwärmungen bei Belastungsverdopplung

4.1 Einfacher Lastsprung

In [4] wurden Hochleistungskabel (Ölpapier- und VPE-Kabel) unterschiedlicher Spannungsebenen (110, 220, 380 kV) hinsichtlich ihrer Überlastbarkeiten bei Verdopplung ansonsten konstanter Dauerlasten 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 Überlastbarkeits-Zeitspannen zwischen 7 und 11 Tagen. Die geringste Überlastbarkeit ergab sich bei einem in thermisch unstabilisiertem 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-

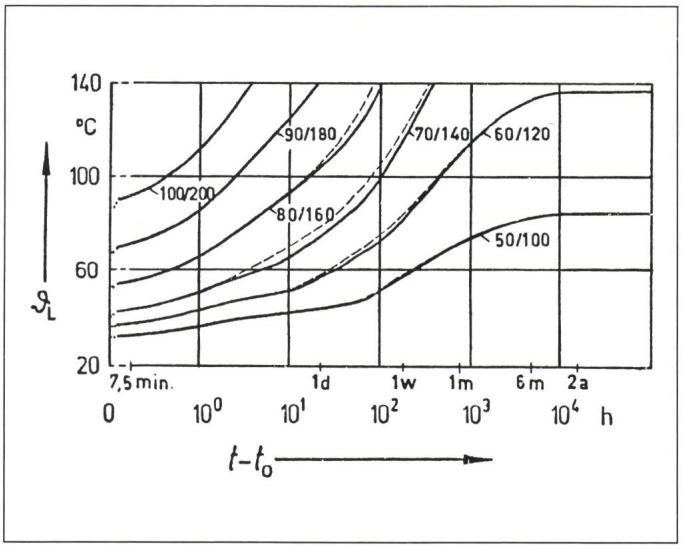


Fig. 3 Leitertemperaturverläufe eines in thermisch unstabilisiertes Rückfüllmaterial gebetteten 110-kV-Ölpapierkabels bei Lastverdoppelung

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

Technische Daten der Kabelanlage:
110-kV-Einleiterkabel mit Öl-Papier-Isolierung

Tabelle I

Kupfersegmentleiter	max. Leitertemperatur	85 °C
	Leiterquerschnitt	1000 mm²
	Füllfaktor	0,85
	Ölkanaldurchmesser	16 mm
	Leiterwandstärke	13 mm
	elektrische Leitfähigkeit	57 m/Ωmm
	Temperaturkoeffizient el. Widerstand	0,0039 /K
	thermische Leitfähigkeit	395 W/K m
	spezifische Wärmekapazität	3,47 Ws/cm³K
Ölpapierisolierung	Dicke	10 mm
	Dielektrizitätszahl	3,6
	Verlustfaktor	0,0025
	thermische Leitfähigkeit	0,2 W/K m
	spezifische Wärmekapazität	2,27 Ws/cm³K
	thermische Leitfähigkeit von Öl	0,14 W/K m
	spezifische Wärmekapazität von Öl	1,50 Ws/cm³K
Bleimantel	Wanddicke	2,7 mm
	thermische Leitfähigkeit	34 W/K m
	spezifische Wärmekapazität	1,48 Ws/cm³K
	Mantelverlustfaktor	0,1
Korrosionsschutz	Dicke	5 mm
	thermische Leitfähigkeit	0,167 W/K m
	spezifische Wärmekapazität	1,64 Ws/cm³K
Verlegung	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/cm³K
	Wärmekapazität, trocken	1,40 Ws/cm³K
	Grenztemperatur Bodenaustrocknung	35 °C
	Umgebungstemperatur	20 °C

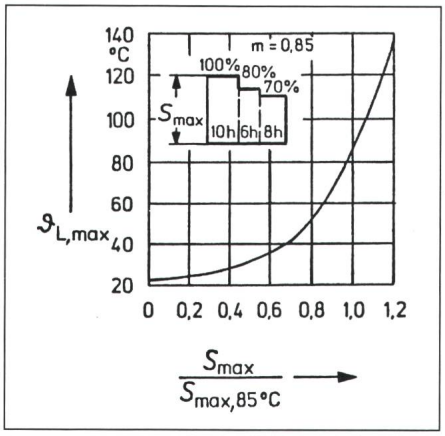


Fig. 4 Tageshöchst-Leitertemperatur eines 110-kV-Ölpapierkabels (Tab. I) bei zyklischem Tageslastverlauf in Abhängigkeit des Auslastungsgrades

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.

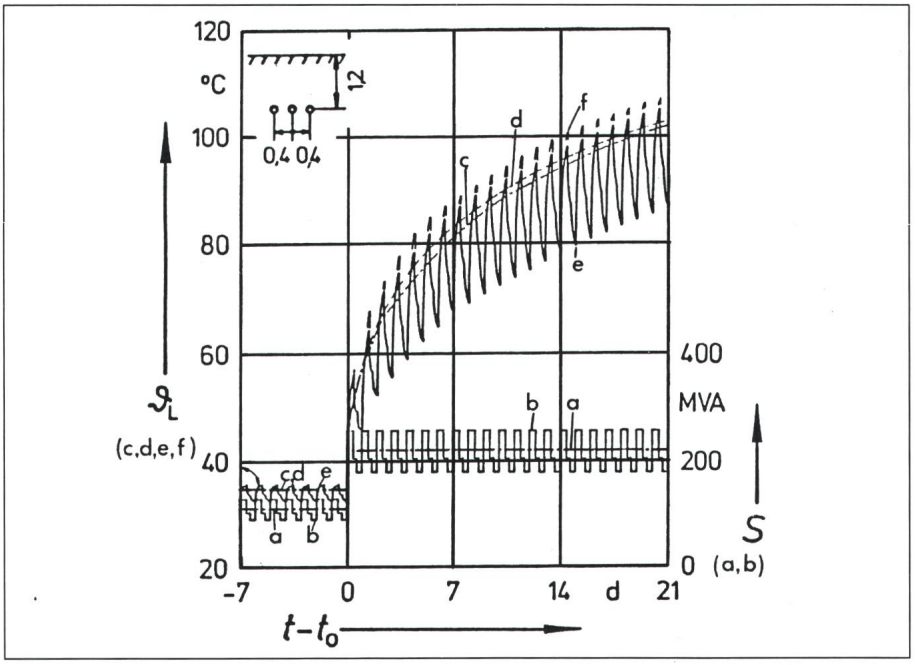


Fig. 5 Übertragungsleistung und resultierender Leitertemperaturverlauf eines 110-kV-Ölpapierkabels (Tab. I) bei einer Lastverdopplung von 60% auf 120% der Belastbarkeit

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 berechneten 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

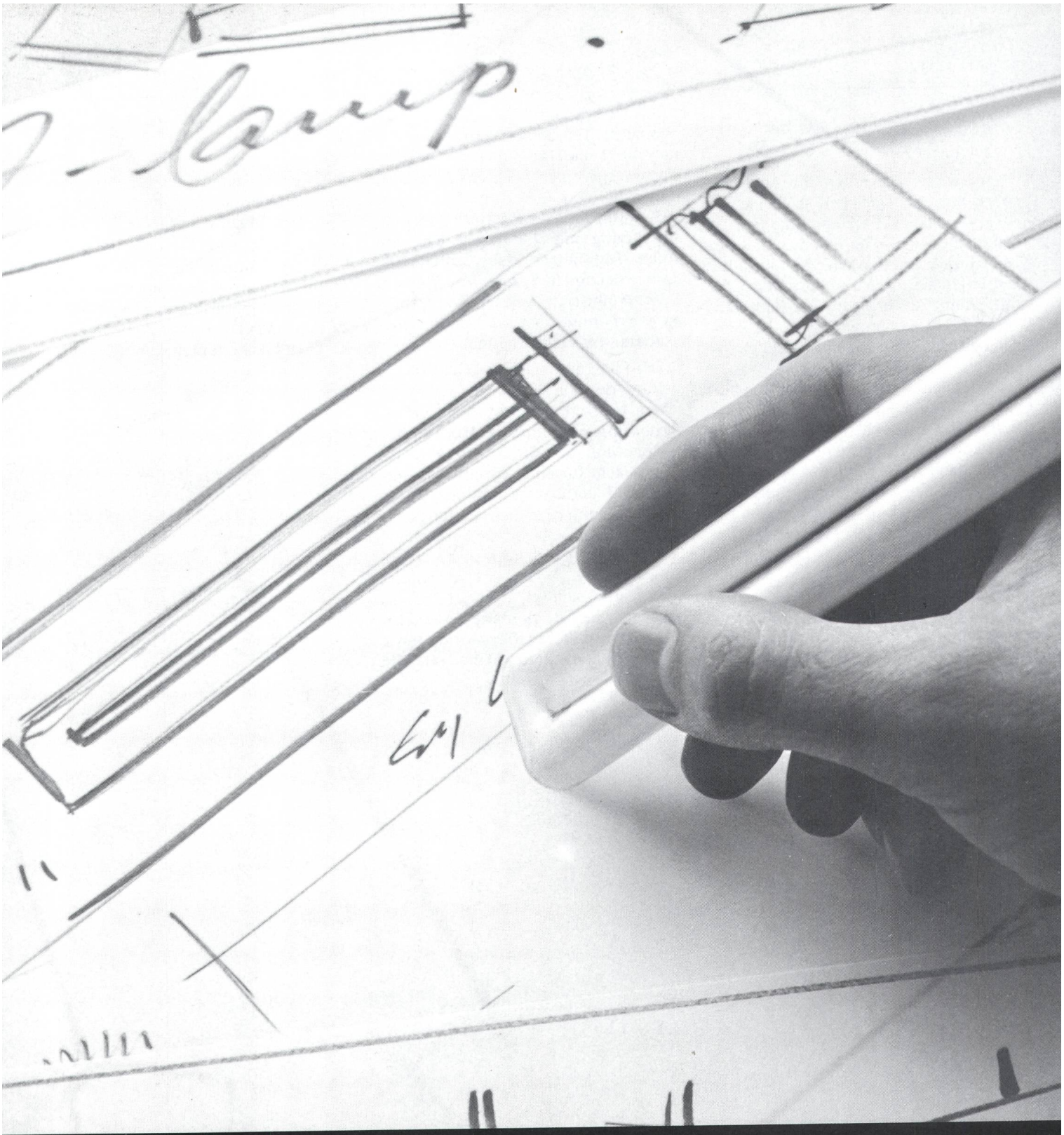
[1] *U. Beyer:* Berechnung transienter Kabelerwärmungen. Elektrizitätswirtsch. 83(1984)26, S. 1114...1117.

[2] *U. Beyer* und *M. Tippmann:* Verstärkung einer 110-kV-Kabelanlage durch VPE-Kabel und resultierende Überlastbarkeiten. Elektrizitätswirtsch. 84(1985)7, S. 234...240.

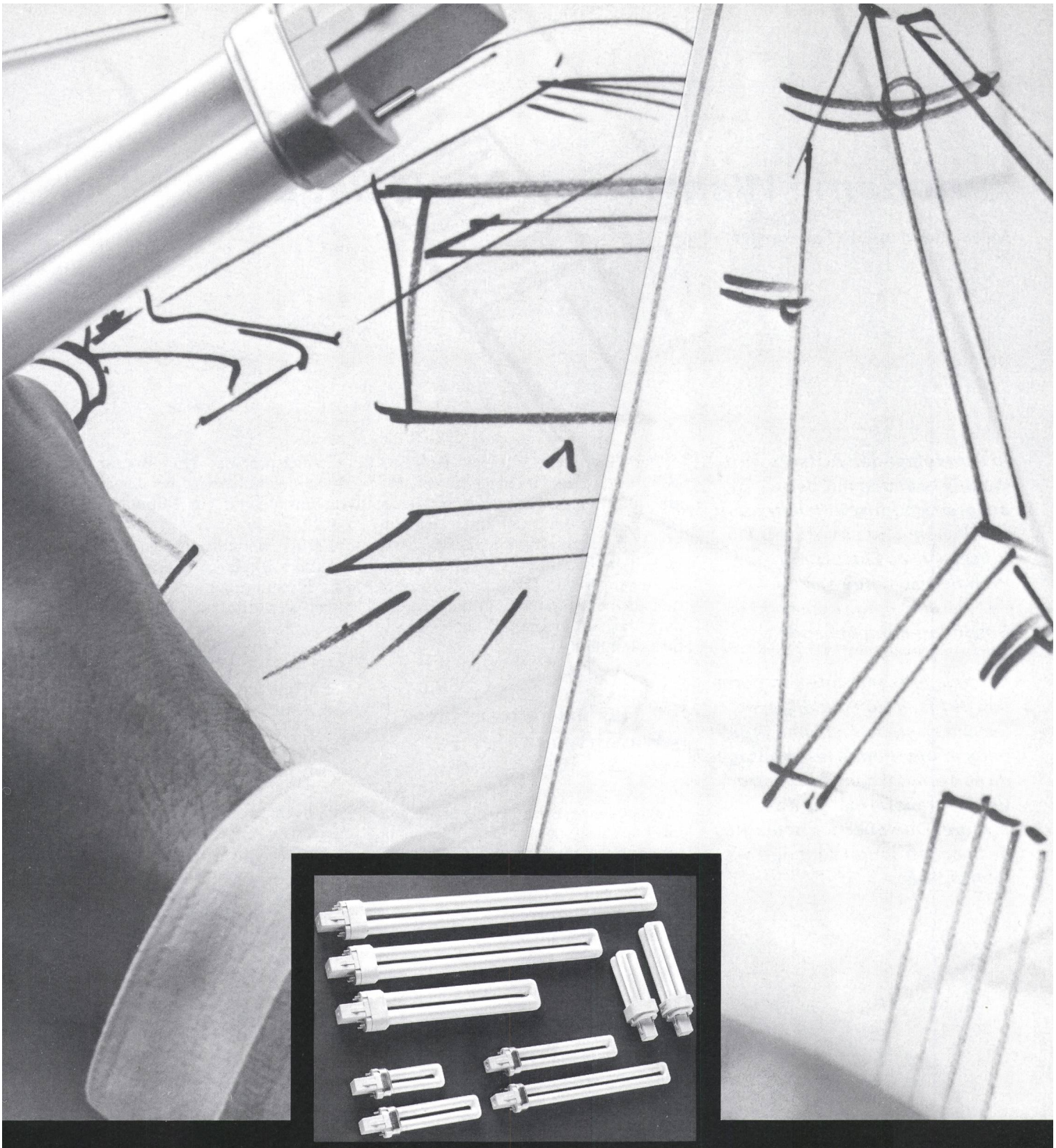
[3] *U. Beyer:* Transiente Erwärmung eines leitergekühlten Hochleistungskabels. ETZ 106(1985)21, S. 1150...1153.

[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.

it den neuen Lynx Kompakt-Leuchtstoff-mpen von Sylvania bietet sich die seltene elegenheit, völlig neuartige Leuchten zu twickeln, anzubieten oder zu gebrau-en. Leuchten, die ästhetisch **und** funktio-ll überzeugen und die im Stromver-auch den Anforderungen der Zukunft erecht werden.

Kompakt, flach und äusserst sparsam Stromverbrauch, verbessern sie die chtausbeute gegenüber herkömmlichen ühbirnen um das Vierfache – und ihre ebensdauer 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.