

Temperaturbestimmung von Leiterseilen

Dipl. Ing. Frank Reinicke

1.1. Notwendigkeit der Temperaturbestimmung von Leiterseilen

Wozu ist die Temperaturbestimmung von Leiterseilen überhaupt notwendig ?

Ein Leitungsneubau oder eine Leitungsertüchtigung wird entsprechend den örtlichen Gegebenheiten für optimale Feldlängen, Maststandorte, Masthöhen und Seildurchhänge geplant, projiziert und schließlich durchgeführt.

Beim Bau/Umbau der Leitung zeigt sich dann gelegentlich, daß trotz Recherchen nach der Grubenausschachtung, ein Maststandort um 3 m versetzt werden muß, da bspw. die Verlegung der Wasser- oder Gasleitung nicht exakt den Planunterlagen entspricht.

Beim Neubau kann die Masthöhe eines Mastes im Einzelfall aufgrund ungenauer Ausschachtung des Fundamentes um ca. 30- 40 cm vom projizierten Zustand abweichen.

Auch können, unabhängig davon, bei der Seilregulage Abweichungen zwischen projiziertem Zustand und Istzustand auftreten.

Bei der EnBW AG wird daher jeder Leitungsneubau, jede Ertüchtigung und jede Masterrhöhung usw. aus Sicherheitsgründen nachvermessen, d.h. 8 - 12 Wochen nach Fertigstellung der Leitung werden Feldlänge, die Masthöhe und der Durchhang jedes Spannungsfeldes gemessen.

Der gemessene Durchhang wird dann auf den Durchhang im projizierten Zustand zurückgerechnet und mit den projizierten Solldurchhangswerten und Seilzugspannungen verglichen.

Hier zeigt sich dann, ob alle sicherheitsrelevanten Abstände und Zugspannungen eingehalten wurden, wieviel Reserve noch in den Abständen vorhanden ist oder ob nötigenfalls eine Nachregulage des Seiles durchgeführt werden muß.

Eine solche Nachvermessung kann bei alten Leitungen auch ohne vorhergehenden Umbau erforderlich werden.

Dies, da aufgrund des über die Lebensdauer des Seiles stattfindenden Seilkriechens (und auch Ungenauigkeiten bei der früher durchgeführten Regulage und Vermessung) der aktuelle Zustand bezüglich der Durchhänge und damit der Sicherheitsabstände nicht mit genügend genauer Sicherheit bekannt ist.

Bei dieser Nachvermessung wird für die Rückrechnung vom gemessenen Durchhang auf den Durchhang im Ausgangszustand die mittlere Seiltemperatur des Spannungsfeldes zum Zeitpunkt der Vermessung benötigt.

1.2 Einflußfaktoren auf die Seiltemperatur

Diese mittlere Seiltemperatur ist in der Regel, auch bei stromloser Leitung, ungleich der Lufttemperatur.

Auf das Leiterseil wirken nachfolgende Störgrößen ein, deren Summe im thermisch stationären Zustand des Seiles sich zu Null addieren.

1. Stromwärme (bei in Betrieb befindlicher Leitung)
2. solare Energiezustrahlung (direkte / indirekte Sonneneinstrahlung)
3. terrestrische Energiezustrahlung (Temperaturstrahlung der Erde)
4. konvektive Wärmeabgabe (Windeinfluß bzw. natürliche Konvektion)
5. Temperaturabstrahlung des Seiles

Beispiele zur Temperatur eines Seiles bei Änderung der Parameter Seilalter und Stromstärke:

Seil	Al/St 240/40	Al/St 240/40	Al/St 240/40
Seilalter	8 Monate ($\varepsilon \cong 0,53$)	10 Jahre ($\varepsilon \cong 0,85$)	10 Jahre ($\varepsilon \cong 0,85$)
Stromstärke	0 A	0 A	280 A
mittlere Windgeschwindigkeit	1 m/s	1 m/s	1 m/s
Lufttemperatur	25°C	25°C	25°C
Globalstrahlung	880 W /qm	880 W /qm	880 W /qm
Seiltemperatur	30,5 °C	33,1 °C	38,3°C

$\Delta\vartheta$ (Seil -Lufttemperatur) = **5,5 °C** bzw. **8,1 °C** bzw. **13,3 °C**.

1.3. Möglichkeiten der Temperaturbestimmung von Leiterseilen

1.3.1. Direkte Messung mit Thermofühlern

Die Möglichkeit der direkten Temperaturmessung mit Hilfe von Thermoelementen und nachgeschalteten Meßeinrichtungen ist zur praktischen Verwendung bei der Nachvermessung aufgrund des sehr hohen Aufwandes zur Anbringung von Messfühlern am Leiterseil nicht geeignet.

1.2.2. Indirekte Temperaturmessung mittels Infrarot-Kamera

Grundsätzliche Vorgehensweise:

Mit der Infrarotkamera wird, ähnlich wie mit einer herkömmlichen Videokamera ein zweidimensionales Bild der von dem zu messenden Körpern zugestrahlten Lichtwellen erzeugt. Im Unterschied jedoch werden hierzu ausschließlich die Lichtwellenlängen der Wärmestrahlung von 2-14 μm verwertet.

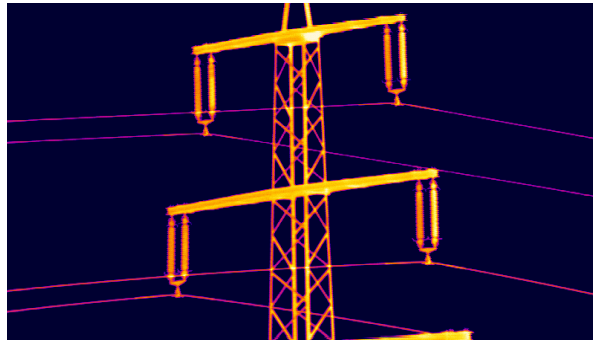


Bild 1

Vorteile der indirekte Temperaturmessung mittels Infrarot-Kamera:

Die Größe Seilstromstärke zum Meßzeitpunkt wird für die Temperaturbestimmung nicht benötigt.

Nachteile:

Eine zentrale Größe bei der berührungslosen Temperaturmessung ist das sogenannte **Emissionsverhältnis des Meßobjektes**.

Dabei handelt es sich um eine dimensionslose Zahl zwischen 0 und 1 ($1 \geq \epsilon \geq 0$) die angibt, welcher Bruchteil der Strahlung eines gleich warmen Schwarzen Körpers (= Strahlungsmaximum) von dem konkreten Meßobjekt emittiert wird.

Neu aufgelegte Seile haben ein Emissionsverhältnis von ca. $\epsilon \approx 0,3$, bei sehr alten Seilen mit oxydierter, und damit rauher Metalloberfläche erhöht er sich auf bis zu 0,9.

Das Emissionsverhältnis von Leiterseilen kann mit empirischen Formeln näherungsweise aus den Größen Seilmaterial und Seilalter bestimmt werden.

Für eine geforderte Meßgenauigkeit von $\pm 3\text{K}$ im Bereich bis 100°C darf nach der Dissertation "Infrarotdiagnose an Verbindungen der energetischen Elektrotechnik" von Herrn Dr.-Ing. Rogler der zulässige Fehler maximal

$$\Delta\epsilon < 0,032 \epsilon$$

betragen.

Für eine sichere Bestimmung der Emissionszahl mit dieser Genauigkeit gibt es verschiedene Methoden (s. obengenannte Dissertation), der Aufwand hierfür käme bei einer Hochspannungsfreileitung jedoch einer direkten Seiltemperaturmessung mit Thermofühlern nahe.

Weiterhin ist in diesem Zusammenhang zu beachten, daß der Emissionsgrad unmittelbar den **Reflexionsgrad** beeinflusst: je geringer der Emissionsgrad, um so höher fallen Strahlungsreflexionen ins Gewicht und umgekehrt. Bei Aufnahmen aus der Luft kann sich der kalte Himmel auf dem Meßobjekt spiegeln (das Objekt erscheint kälter), bei Aufnahmen vom Boden kann sich der wärmere Boden spiegeln (das Objekt erscheint wärmer).

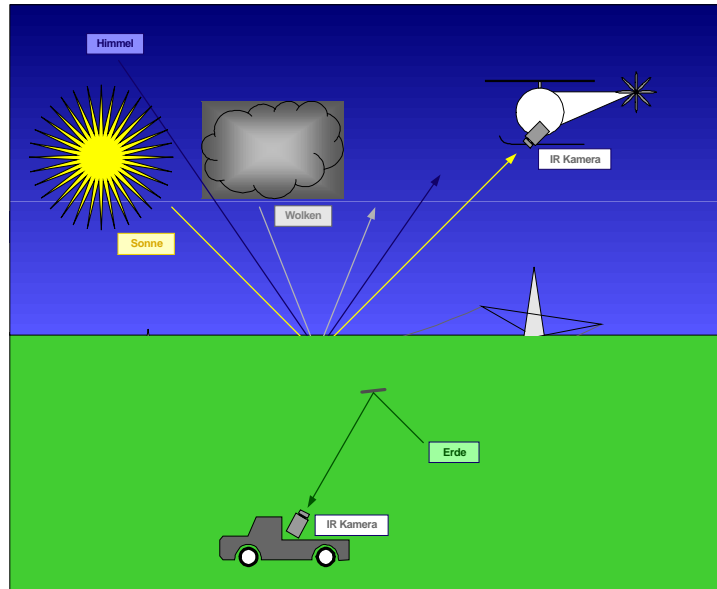


Bild 2

Dieser Effekt kann von der in der Kamera befindlichen Software kompensiert werden, sofern als weiterer Meßparameter die sogenannte **äquivalente Umgebungstemperatur** (T_{ambient}) ermittelt wird. Dies läßt sich nach zusätzlicher Messung von Globalstrahlung und Lufttemperatur bestimmen.

1.3.3. Temperaturbestimmung mittels thermostatischem Seilmodell

-Vorgehensweise:

Mittels einer Meßstation (s. Bild 3), werden die Umgebungsparameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Globalstrahlung über ein Meßintervall von 5–15 min gemessen und eine Mittelwertbildung durchgeführt. Die Erdbodentemperatur wird aufgrund der geringen Einflußnahme auf die Seiltemperatur mit genügender Genauigkeit aus obigen Größen ermittelt.

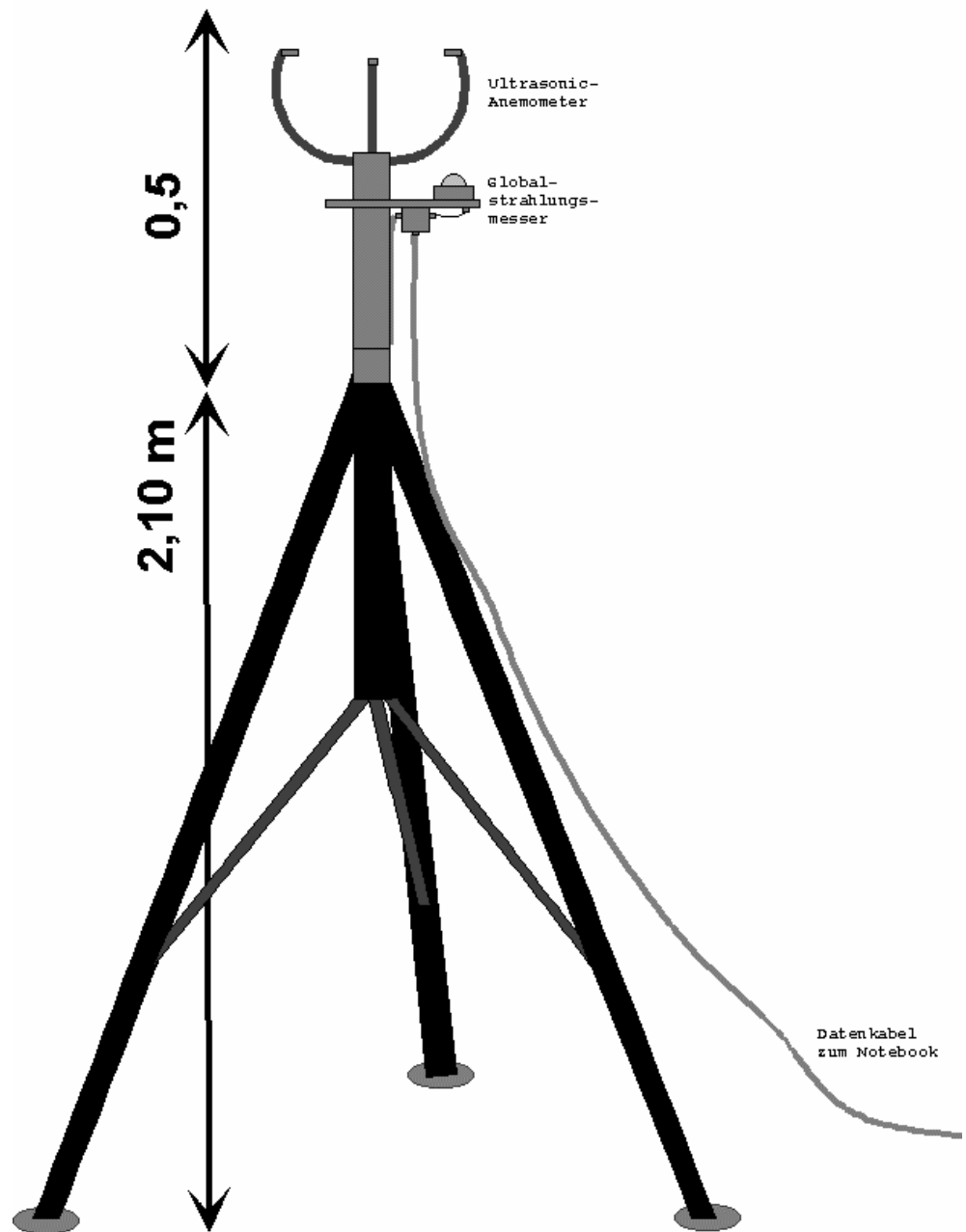
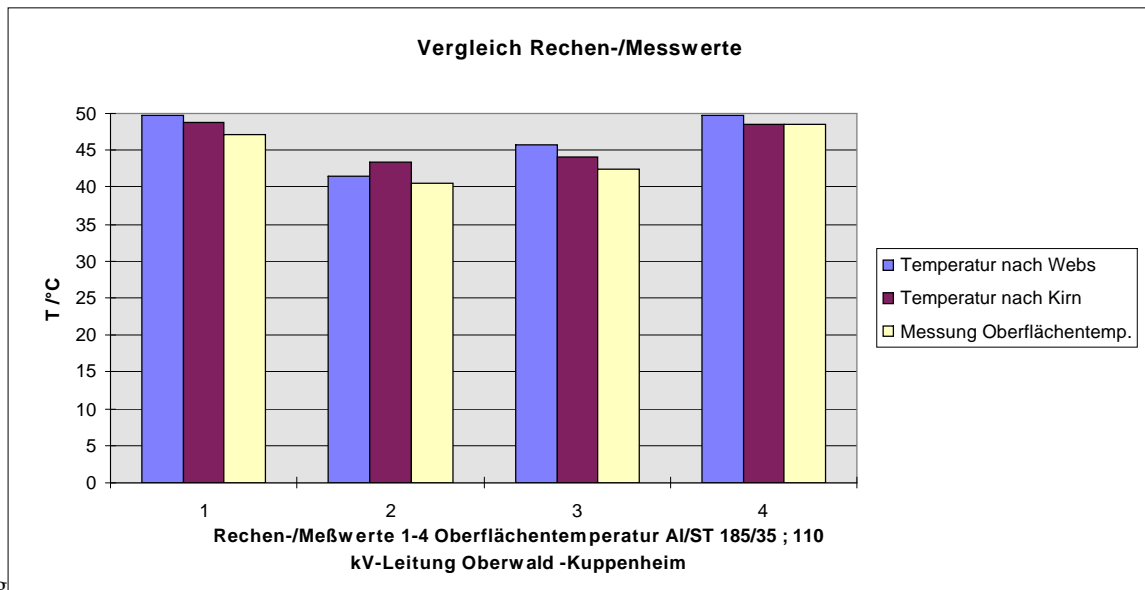


Bild 3

Diese Größen werden einem Berechnungsmodell zugeführt, welches den thermostatischen Zustand des Seiles nachbildet.

Ein solches thermostatische Modell wurde 1987 vom Institut für Rationelle Energieanwendung der FH Karlsruhe unter Leitung von Prof. Herbert Kim in Zusammenarbeit mit der Badenwerk AG, Sachgebiet Trassierung Hochspannungsleitungen unter Leitung von Herrn Markus Palic entwickelt und durch Freilandmessungen an Al/St-Seilen bestätigt.



ng

Temperatur nach Kirn (°C) :	48,8	43,5	44,2	48,6
Temperatur nach Webs* (°C):	49,7	41,4	45,8	49,8
Messung Oberflächentemperatur:	47,1	40,5	42,5	48,5
delta Webs* (°C) zur Oberflächentemperatur:	+2,6	+0,9	+3,3	+1,3
delta Kirn (°C) zur Oberflächentemperatur:	+1,7	+3	+1,7	+0,1

* Es existieren neben dem Rechenmodell nach Kirn noch weitere thermostatischen Seilmodelle u.a. von:

A. Webs, Siemens-Schuckertwerke AG, Erlangen (1963)

V.T. Morgan, CSIRO Division of Applied Physics, Sydney, Australia (1982)

Das thermostatische Modell nach Webs wurde entwickelt, um die Dauerstrombelastbarkeit von Seilen unter gegebenen worst-case-Bedingungen festlegen zu können.

Eine Vergleich zwischen Meßwerten und Rechenwerten des Webs-Modelles erfolgte in erster Linie für die worst-case-Bedingungen

**70°C bzw. 80 °C, Seiltemperatur,
0,6 m/s Windgeschwindigkeit.**

Bei Eingabe von üblichen Betriebswerten für Umgebungsbedingungen und Stromstärken zeigen die Modelle nach Webs und Kirn nur geringe Abweichungen voneinander.

Bei hohen Stromstärken nahe der definierten Dauerstrombelastbarkeit und darüber weichen die Modelle nach Kirn und Webs jedoch zunehmend voneinander ab (s.Bild 4).

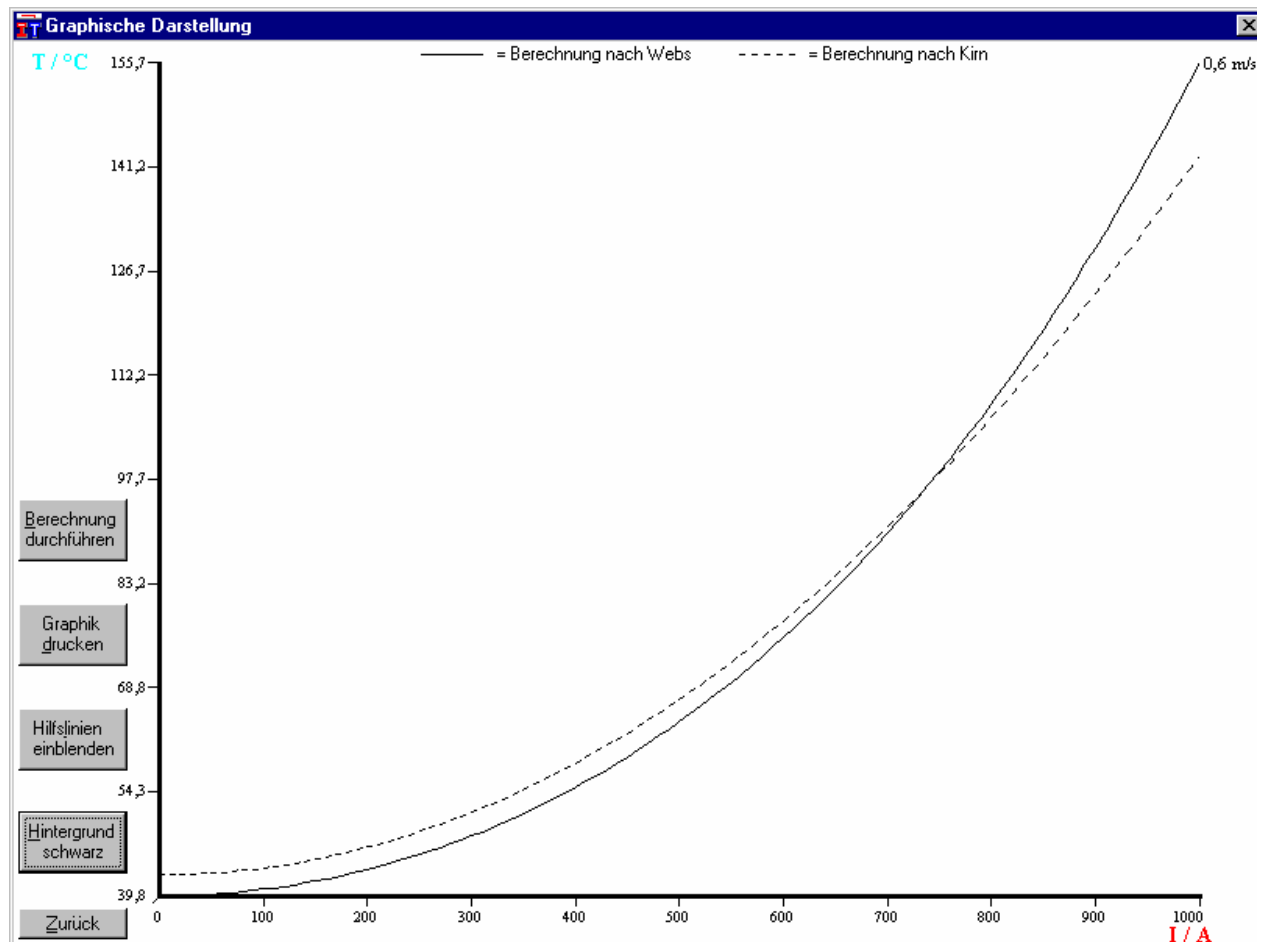


Bild 4: Beispielrechnung: AL/ST 240/40; 0,5 Jahre; 0,6 m/s; 1000 W/qm; 35°C

Das thermostatische Modell von Morgan wurde zur Temperaturbestimmung von Leiterseilen entwickelt. Bei manueller Nachrechnung und Vergleichen mit den durch Messung und Rechnung bestätigten Werten zeigten sich nur geringe Abweichungen der Verfahren Morgan/Kirm/Webbs. Weitere Untersuchungen wurden aufgrund des hohen Aufwandes der manuellen Nachrechnung von meiner Seite nicht durchgeführt.

Vorteile der Temperaturbestimmung mittels thermostatischem Seilmodell:

1. Bei Einsatz von praxismgerechter Hard- und Software zur Bestimmung und Weiterverarbeitung der benötigten Parameter ist diese eine vergleichsweise wenig aufwendige und wenig kostenintensive Methode zur Seiltemperaturbestimmung.

Nachteile:

1. Rechenmodell bei Regen oder genäßigtem Seil oder Eisansatz nicht anwendbar.
2. Die Seiltemperatur bei in Betrieb befindlicher Leitung ist i.d. Regel nicht vor Ort bestimmbar. Es muß zunächst die Stromstärken-Tagesgangkennlinie der entsprechenden Leitung von der Schaltleitung angefordert werden. Alternativ könnten diese Werte mittels Mobiltelefonie auch direkt bei der Schaltleitung abgefragt werden.

3. Die Temperatur des Seiles hängt in starkem Maße von der Windgeschwindigkeit in Seilhöhe ab. Eine genügend genaue Umrechnung zwischen Windgeschwindigkeit in 2, 5 m Höhe und Windgeschwindigkeit in Seilhöhe ist bei relativ freistehender Meßstation möglich. Bei einer Wohngebiets- oder Waldüberspannung kann jedoch die Meßwertaufnahme direkt unter der Leitung nicht erfolgen, es muß die Windgeschwindigkeit in Seilhöhe, bzw. an einer evtl. in der Nähe befindlichen freistehenden Erhebung (Gebäudedach) erfolgen.
- 4.1 Durchführung der Nachvermessung möglichst bei Windgeschwindigkeiten gleich bzw. größer als 0,6 m/s senkrecht zur Seilachse sowie mittlere Windrichtungen größer 20° bzw. kleiner 160° zur Seilachse (innerhalb des Meßintervalles).
- 4.2 Belastung der Leitung (während des Meßintervalles) mit Stromstärke kleiner bis maximal gleich Nennstromstärke.
- 4.3 Berechnete Seiltemperaturen < 65°C (ergibt sich zumeist aus 4.1 u. 4.2) .

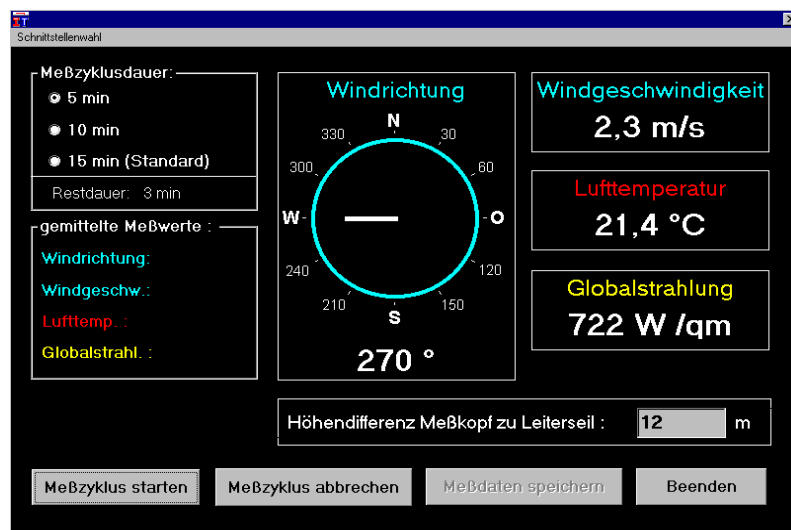
Die Einschränkungen 4.1 bis 4.3 bedeuten nicht, daß das thermostatische Modell nach Kirn jenseits dieser Bereiche versagen würde.

Diese Einschränkungen habe ich deshalb angegeben, da ich für diese Bereiche keine entsprechende Vergleichswerte aus Freilandmessungen zur Untermauerung des Rechenmodells vorliegen habe.

Es sei jedoch angemerkt, daß diese Rahmenwerte 4.1 – 4.3 im praktischen Einsatz bei den meisten in Betrieb befindlichen Leitungen, sowie den in Deutschland herrschenden Windverhältnissen eingehalten werden .

Das Programm STS gibt bei Überschreitung einer dieser Beschränkungen eine entsprechende Meldung bzw. im Ausdruck einen Vermerk aus, der Vermesser oder Leitungsplaner kann im Einzelfall bei entsprechend kritischen Werten für Durchhang oder Zugspannung die Entscheidung für eine nochmalige Nachvermessung des betreffenden Spannungsfeldes fällen.

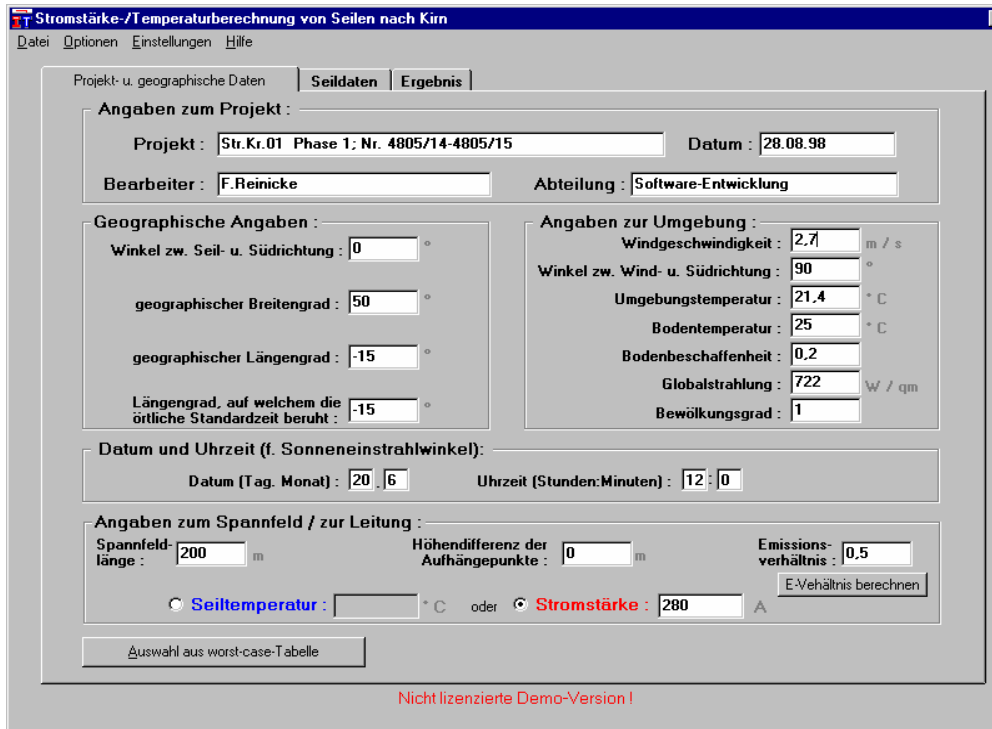
1.3.4. Beispiel zur Temperaturbestimmung mittels thermostatischem Seilmodell



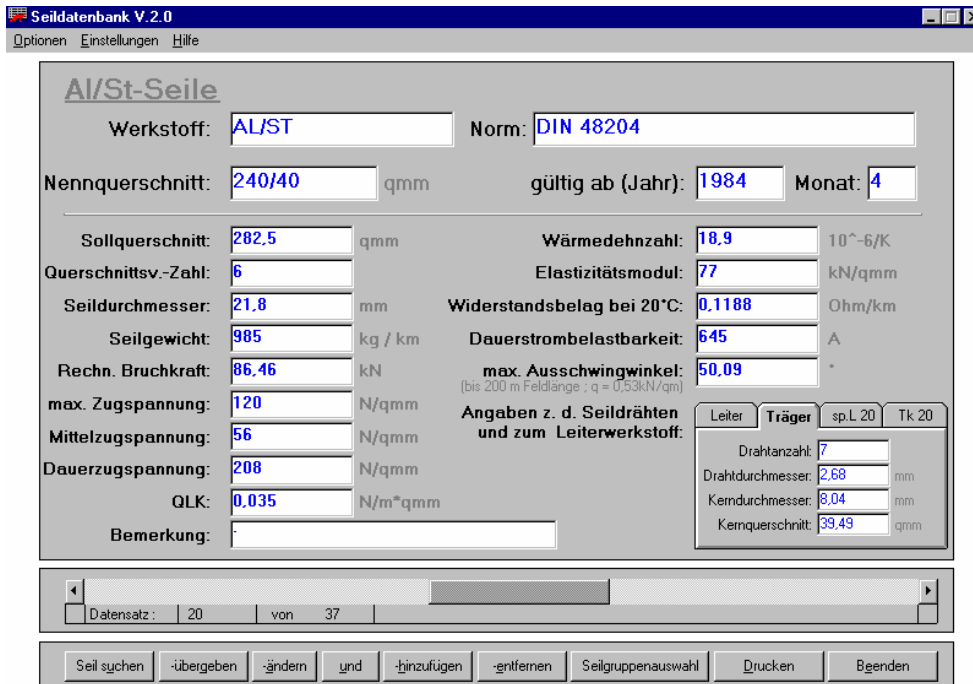
1. Meßwertaufnahme und Mittelwertbildung mit Meßstation (s. Bild 3) und zugehöriger Software

STS V.2.0 :

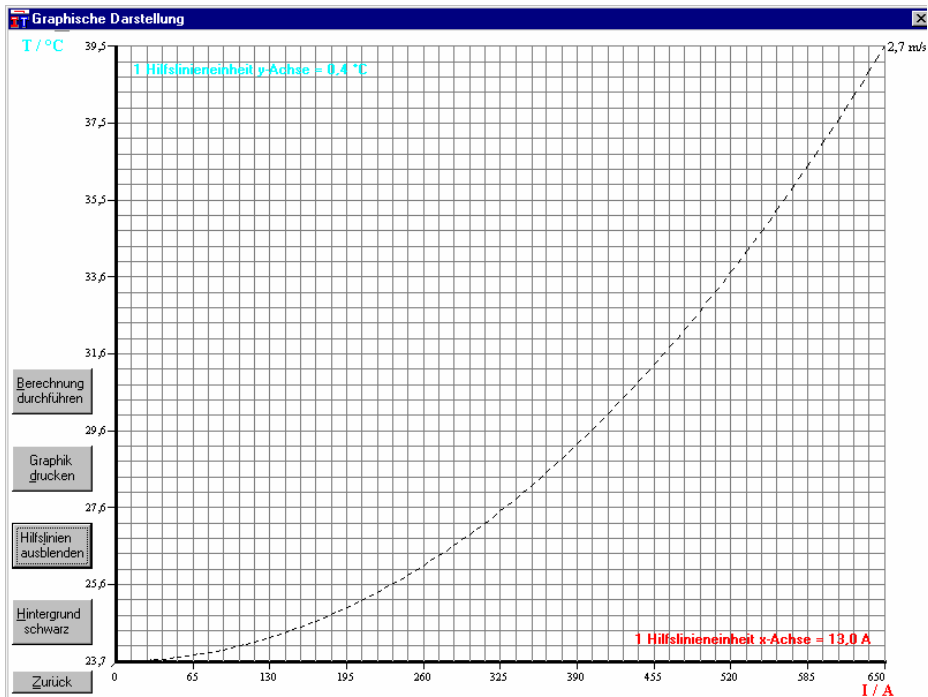
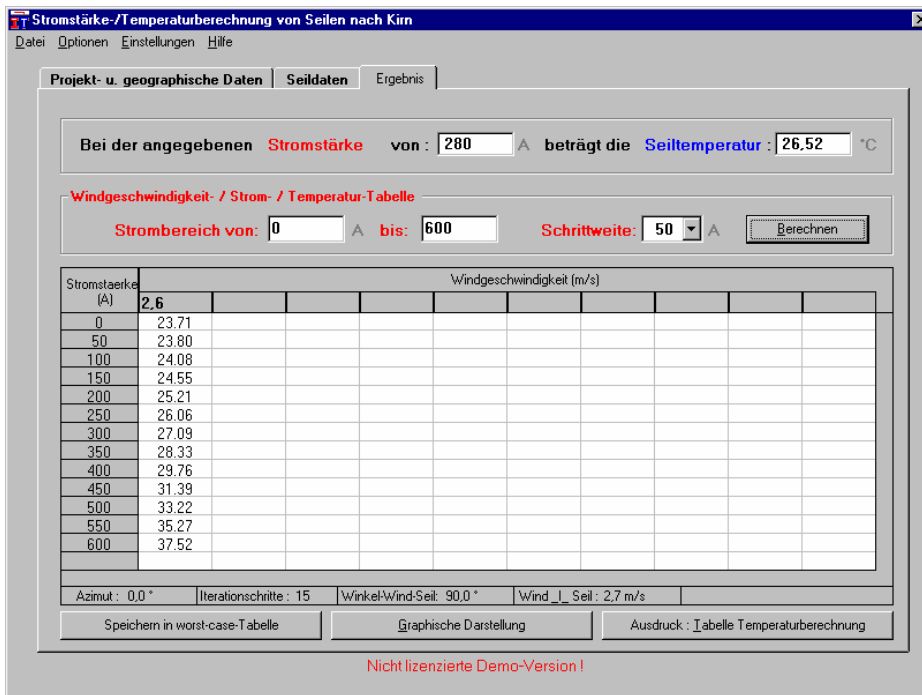
- Übergabe der gemittelten und höhenkorrigierten Werte an das Berechnungsmodul des Programmes und Eingabe der zusätzlich benötigten Parameter :



- Auswahl des entsprechenden Leiterseiles aus der Seildatenbank:



4. Ausgabe des Temperaturwertes als Zahl und Möglichkeit der Ausgabe von Tabelle und Funktionskurve mit Temperaturwerten für einen frei definierbaren Stromstärkebereich zur Verwendung bei zunächst unbekannter Stromstärke .



2. Bestimmung der Stromtragfähigkeit von Freileitungsseilen

(Anmerkung: Dieser Teil des Referates wurde in der Leitungsbaufachtagung 1999 aus Zeitgründen nur gekürzt vorgetragen)

Umgekehrt kann ein thermostatisches Seilmodell dazu verwendet werden, aus gegebenen Bedingungen für Umgebungsparameter und maximal zulässiger Seiltemperatur eine maximale Stromtragfähigkeit des Leiterseiles zu errechnen.

Es wird empfohlen, hierzu das thermostatische Modell nach Webs in Anwendung zu bringen, da dieses durch Freilandmessungen unter worst-case-Bedingungen untermauert wurde.

Eine solche Anwendung ermöglicht z. B. den jahreszeitabhängigen Betrieb von Hoch- und Mittelspannungsfreileitungen. Bei jahreszeitlich bedingten Engpässen lassen sich hiermit im Einzelfall Investition zur Erhöhung der Stromtragfähigkeit zeitlich nach hinten schieben, ohne die vorgegebene Seiltemperatur zu über- u. damit die Sicherheitsabstände zu unterschreiten.

Es wird hierzu eine Unterteilung des worst-case-Falles (35°C; 1000 W/qm; 0,6 m/s) in 3 jahreszeitlich bedingte worst-case-Fälle vorgenommen.

Dazu nachfolgend ein Beispiel einer Al/St-240/40- Leitung, berechnet mit dem thermostatischen Modell nach Webs:

	max. Umgebungs- temperatur	max. Globalstrahlung	min.Wind- geschwindigkeit:	Stromtragfähigkeit bei 80°C Seiltemperatur (Seilalter 1,5 a):	%- Zugewinn
Sommer 1.Mai - 15.Sept	35°C	1000 W / qm	0,6 m/s	642 A	-
Übergangszeit 16.Feb. - 31.April 16.Sept. - 30.Okt.	27,5°C	800 W /qm	0,6 m/s	711 A	10,7 %
Winter 1.Nov - 15. Feb.	20°	600 W /qm	0,6 m/s	768 A	19,6 %

Anmerkung: Diese Unterteilung ist für die Anwendung in Deutschland gedacht. In anderen Ländern sind entsprechend den vorliegenden Klimadaten die jahreszeitlich bedingten worst-case-Fälle zu ermitteln.

Bei Instandhaltungsmaßnahmen über kurze Zeiträume (2-3 Tage) und bekannten Witterungsbedingungen kann zudem geprüft werden, ob bei den Leitungen, welche den Stromtransport der abgeschalteten Leitung übernehmen, unter den worst-case-Bedingungen dieses Zeitraumes die max. zulässige Seiltemperatur eingehalten wird oder zusätzliche Maßnahmen erforderlich werden.

3. Verwendbarkeit der thermostatischen Modelle bei sogenannten "heißen Seilen"

Das **thermostatische Seilmodell nach Kirn** ist zur Nachvermessung unter Berücksichtigung der Einschränkungen 4.1 – 4.3 auch bei den unter „heiße Seile“ bekannten TAL- und TAL/St-Seilen anwendbar.

Diese Seile unterscheiden sich weder im Aufbau noch bei den physikalischen Eigenschaften (mit Ausnahme der geringeren Entfestigung bei hohen Temperaturen) wesentlich von den entsprechenden Al- bzw. Al/St-Seilen.

Das **Seilmodell nach Webs** wird zur Festlegung der Dauerstrombelastbarkeit bei variablen Umgebungsbedingungen in der Praxis nach meinem Kenntnisstand auch bei TAL- und TAL/St-Seilen angewandt.

Aufwendige und von seitens des Versuchsaufbaus sehr "schöne" Langzeit-Freileitungsversuche mit TAL/St-Seilen wurden vom größten deutschen Energieversorger schon vor geraumer Zeit durchgeführt.

Aufgrund des allseits ausgebrochenen Wettbewerbes wird die daraus gewonnene Wissensbasis jedoch verständlicherweise, aber zu meinem Bedauern nicht mehr an andere Unternehmungen weitergegeben.