

*Referat zum Forum Netzbau und Betrieb
Leitungsbau-Fachtagung am 15. und 16. Mai 2003 in Königswinter*

Leiterseil-Temperaturbestimmung zur verbesserten Durchhangsermittlung

Dipl. Ing. Frank Reinicke

Eine korrekte Durchhangsermittlung erfordert – sei es zur Regulage oder bei der Bestandserfassung – die genaue Kenntnis der Seiltemperatur. Umfangreiche Untersuchungen und Feldversuche haben ein Verfahren hervorgebracht, mit dessen Hilfe die Seiltemperatur unter Berücksichtigung aller maßgeblichen Parameter berechnet werden kann. Der Beitrag informiert über Historie, Ablauf u. wirtschaftliche Gesichtspunkte des Berechnungsverfahrens.

1. Historie – Entstehung u. Einsatz des Berechnungsverfahrens

Anfang der 80er Jahre beschäftigte man sich bei den meisten größeren Energieversorgungsunternehmen mit der Thematik der Abhängigkeit der Leiterseiltemperatur von der Strombelastung und den daraus resultierenden Leiterseil-Durchhängen.

Eine gewisse Vorreiterrolle übernahm man hierbei 1985 bei der ehemaligen Badenwerk AG mit der Beauftragung der Studie

Die Bestimmung der Temperatur von Freileitungsseilen

beim Institut für Rationelle Energieanwendung der Fachhochschule Karlsruhe.

Unter maßgeblicher Beteiligung des damaligen Kollegen Herrn Dipl. Ing. Markus Palic sowie Herrn Prof. Herbert Kirn entstand 1987 als Ergebnis dieser Studie ein Verfahren mit dessen Hilfe die Seiltemperatur unter Berücksichtigung aller maßgeblichen Parameter genügend genau berechnet werden konnte.

Mit umfangreichen Untersuchungen und Feldmessungen in den Jahren 1987-89 wurde die Verwendbarkeit des Verfahrens bestätigt.

Das Berechnungsverfahren wurde in ein PC-Programm umgesetzt, es wurden die entsprechenden Meßgeräte zur Aufnahme der maßgeblichen Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, und Lufttemperatur beschafft und in eine transportable Meßstation mit Meßwertspeicherung integriert.

Ab Ende 1989 wurde das Verfahren für das damalige Badenwerk Hoch- und Höchstspannungsnetz flächendeckend eingeführt.

In der Folge wurde diese Form der Durchhangsbestimmung bei der RWE AG, der damaligen

Bayernwerk AG (heute E.ON) und weitere EVU's sukzessive eingeführt.

In den Jahren 1997-99 erfolgte die Entwicklung einer verbesserten, komfortableren Version von Berechnungsprogramm u. Meßstation und im August 2002 wurde mit weiterführenden Messungen die Anwendbarkeit des Verfahrens letztmalig bestätigt.

2. Notwendigkeit der Temperaturbestimmung von Leiterseilen zur Durchhangsermittlung

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, projektiert und schließlich durchgeführt.

Beim Neubau kann die Masthöhe eines Mastes im Einzelfall aufgrund ungenauer Ausschachtung des Fundamentes um ca. 30- 40 cm vom projektierten Zustand abweichen. Auch können, unabhängig davon, bei der Seilregulage Abweichungen zwischen projektiertem Zustand und ausgeführtem Istzustand auftreten.

Daher wird jeder Leitungsneubau, jede Ertüchtigung und jede Masterrhöhung nachvermessen, d.h. ca. 8 - 12 Wochen nach Fertigstellung der Leitung werden Feldlänge, die Aufhängepunktshöhe und der Durchhang jedes Spannungsfeldes gemessen.

Der gemessene Durchhang unter den angetroffenen meteorologischen Bedingungen wird dann auf den Durchhang im projektierten Zustand mit definierter Seiltemperatur (Bsp. +80°C oder -5°C + einfache Eislast) zurückgerechnet und mit den projektierten Solldurchhangswerten und Seilzugspannungen verglichen.

Für diese Rückrechnung vom gemessenen Durchhang auf den Durchhang im Ausgangszustand wird die Leiterseiltemperatur zum Zeitpunkt der Vermessung benötigt.

Bei dieser Rückrechnung 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 desweiteren bei alten Leitungen auch ohne vorhergehenden Umbau erforderlich werden, da aufgrund des über die Lebensdauer des Seiles stattfindenden Seilkriechens der aktuelle Zustand bezüglich der Durchhänge und damit der Sicherheitsabstände nicht mit genügend genauer Sicherheit bekannt ist.

3. Einflußfaktoren auf die Leiterseil-Temperatur

Die mittlere Leiterseiltemperatur 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

Nachfolgend ein reales Beispiel eines Spannungsfeldes mit Seilen verschiedenen Seilalters und Stromlast. Die Seiltemperaturen wurden sowohl berechnet als auch mit Hilfe eines direkt am Seil befestigten Thermoelementes mit nachgeschaltetem Datalogger gemessen.

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	25,0°C	25,0°C	25,0°C
Globalstrahlung	880 W /qm	880 W /qm	880 W /qm
Seiltemperatur	30,5 °C	33,1 °C	38,3°C

Die Unterschiede der Seiltemperaturen zur Lufttemperatur betragen 5,5 K bzw. 8,1 K bzw. 13,3 K !

4. Ablauf des Verfahrens zur Leiterseil-Temperaturbestimmung

Zeitgleich zur Durchhangsvermessung werden am Spannungsfeld vor Ort zusätzlich mittels der Meßstation (s. Bild 1) die Umgebungsparameter

- Windrichtung,
- Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- Globalstrahlung

über ein Meßintervall von 5–15 min gemessen, zusammen mit der Uhrzeit abgespeichert und eine Mittelwertbildung über das Meßintervall durchgeführt. Die Erdbodentemperatur wird aufgrund der geringen Einflußnahme auf die Seiltemperatur mit genügender Genauigkeit aus obigen Größen ermittelt.

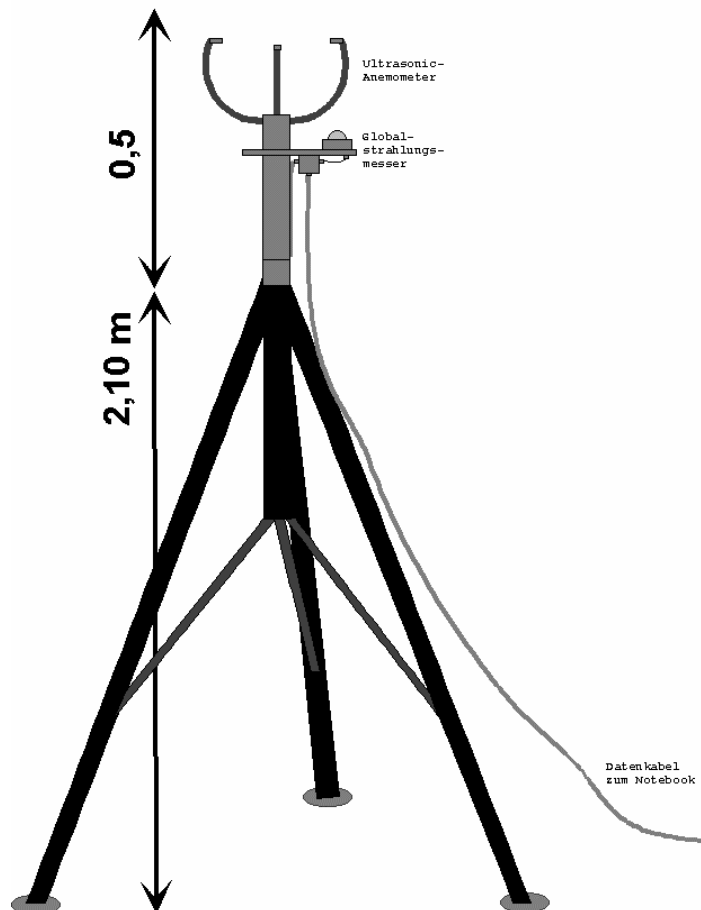


Bild 1

Diese Größen werden dem Berechnungsmodell zugeführt, welches mit Hilfe von weiteren Parametern wie

- Seildurchmesser
- Widerstandsbelag
- Temperaturkoeffizient des Leiterwerkstoffes
- Seilalter
- Stromstärke

den thermostatischen Zustand des Seiles nachbildet und die resultierende Seiltemperatur berechnet (s. Screenshots PC-Programm).

Stromstärke-/Temperaturberechnung von Seilen nach Kinn

Projekt- u. geographische Daten | **Seildaten** | Ergebnis

Angaben zum Projekt:

Projekt: Messung 01 - 110kV Kuppenheim-Oberwald Datum: 16.08.02

Bearbeiter: F. Reinicke 12:06 Uhr Abteilung: SWLFR

Geographische Angaben:

Winkel zw. Seil- u. Südrichtung: 75 °

geographischer Breitengrad: 49.4 °

geographischer Längengrad: -8.4 °

Längengrad der örtlichen Standardzeit: 15 °

Angaben zur Umgebung:

Windgeschwindigkeit in Seilhöhe: 2.2 m / s

Winkel zw. Wind- u. Südrichtung: -137 °

Umgebungstemperatur: 26.7 ° C

Bodentemperatur: 27.7 ° C

Bodenbeschaffenheit: 0.26

Globalstrahlung: 723 W / qm

Bewölkungsgrad: 1

Datum und Uhrzeit (f. Sonneneinstrahlungswinkel):

Datum (Tag. Monat): 16. 8 Uhrzeit (Stunden:Minuten): 12: 6

Angaben zum Spannfeld / zur Leitung:

Spannfeldlänge: 258.8 m Höhendifferenz der Aufhängepunkte: 1.6 m Emissionsverhältnis: 0.883

Seiltemperatur: ° C Stromstärke: 0 A

Stromstärke-/Temperaturberechnung von Seilen nach Kinn

Projekt- u. geographische Daten | **Seildaten** | Ergebnis

Aus Seildatenbank auswählen

Werkstoff: AL/ST Norm: d

Nennquerschnitt: 185/32 qmm gültig ab (Jahr): 1950 Monat: 1

Sollquerschnitt: 215.5 qmm Widerstandsbelag bei 20°C: 0.1571 Ohm/km

Seildurchmesser: 19.2 mm spez. Leitfähigkeit des Leiterwerkstoffes bei 20 °C: 35.38 m / Ohm*mm²

Seilgewicht: 744 kg/km Widerstandsberechnungsfaktor: 0.03928

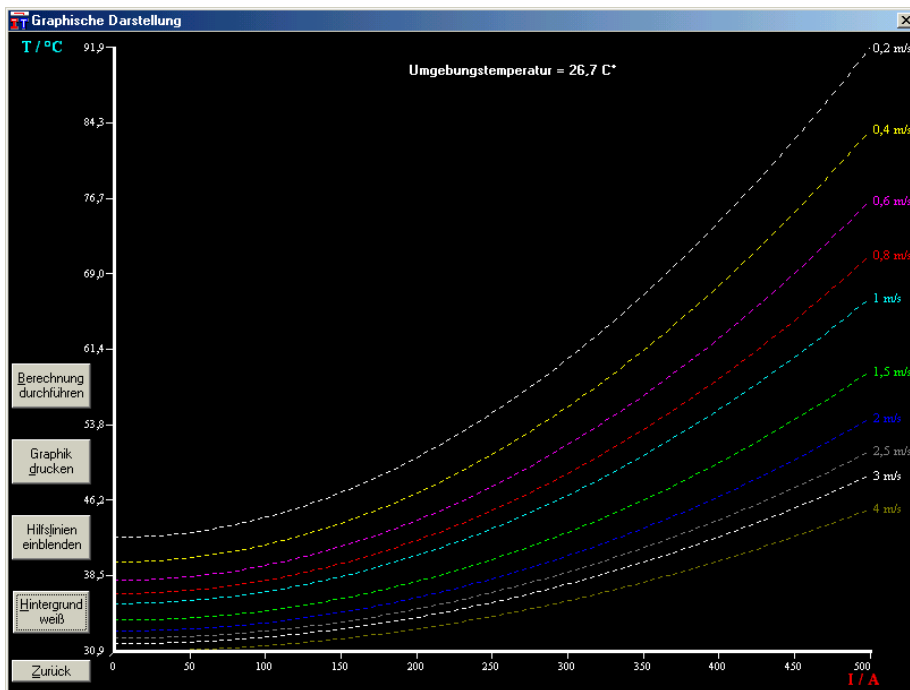
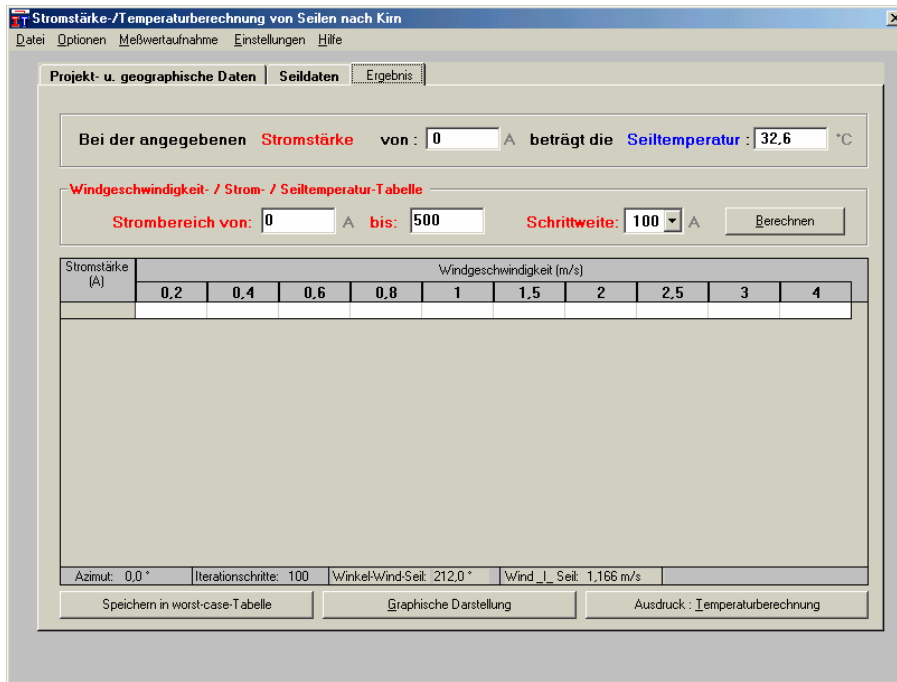
rechn. Bruchkraft: 66.28 kN Temperaturkoeffizient des Leiterwerkstoffes für 20 °C: 0.004 1 / K

Wärmedehnzahl: 18.9 10⁻⁶/K Dauerstrombelastbarkeit: 535 A

Elastizitätsmodul: 77 kN/qmm max. zulässige Seiltemperatur: °C

Bemerkung:

(Die blau unterlegten Werte kennzeichnen die in diesem Programm für der Berechnung relevanten Seildaten)



Lediglich bei Regen bzw. genäßtem Seil oder Eisansatz ist dieses Verfahren zur Bestimmung der Seiltemperatur nicht anwendbar.

5. Vergleich mit „herkömmlicher“ Methode

Als Alternative zu dieser aufwendigeren und auch mit Mehrkosten belasteten Art der Durchhangsbestimmung wurde und wird bis heute z. T. die Durchhangsermittlung auf „herkömmliche Art“ durchgeführt, d.h. es wird vereinfacht die Umgebungstemperatur mittels Thermometer gemessen und mit der Annahme

$$\text{Umgebungstemperatur} = \text{Leiteseiltemperatur}$$

die Rückrechnung durchgeführt.

Man ist bei dieser getroffenen Annahme in der überwiegenden Zahl der Fälle bezüglich der Abstände nach zum Boden auf der „sicheren Seite“, da die Umgebungstemperatur meist unterhalb der Leiteseiltemperatur zu finden ist.

Bei der Rückrechnung wird auf diese Weise nämlich ein größerer Seildurchhang im Ausgangszustand ermittelt, den es für die Sicherheitsabstände zu beachten gilt.

Man nimmt jedoch Masterhöhungen, Nachregulagen, Einbau kürzerer Ketten oder ähnliche abstandsvergrößernden Maßnahmen in Kauf, welche bei genauerer Kenntnis der tatsächlichen Durchhänge in einigen Fällen nicht erforderlich wären (siehe unten aufgeführtes Beispiel mit Tabelle) und daher eingespart werden könnten.

Bei geforderten Mindestabständen nach oben wie sie z.B. bei einer Unterkreuzung auftreten, verhält es sich umgekehrt; in Fällen ohnehin geringer Abstände und einer real höheren Zugspannung können u. U. gefährliche Minderabstände auftreten.

In eine ebenfalls sicherheitstechnisch bedenkliche Richtung kann sich die Anwendung einer derart vereinfachten Durchhangsermittlung auf die Zugbelastung bei Abspannmasten entwickeln – hier kann bei ungünstiger Konstellation eine unzulässige Überbeanspruchung auftreten; dazu ein Beispiel:

Im Zuge einer Nachmessung einer Leitung mit zwischenzeitlich relativ hohen Übertragungsleistungen, ursprünglich ausgelegt für eine Sollzugspannung von 80 N/qmm und eine Leiteseiltemperatur von +40°C, wird mit der Annahme

$$\text{Umgebungstemperatur} = \text{Leiteseiltemperatur}$$

eine Istzugspannung von rd. 76 N/qmm ermittelt.

Diese Leitung ist nun aufgrund der mittelfristig zu erwartenden Strombelastung für eine Leiteseil-Temperatur von +80°C zu ertüchtigen, was unter Inkaufnahme einer leichten Überziehung auf z.B. 83 N/qmm ohne Masterhöhung und aus maststatischer Sicht auch technisch möglich ist.

Tatsächlich beträgt die reale Seilzugspannung im Ausgangszustand in diesem Fall jedoch nicht 76, sondern bereits 83 N/qmm und durch die Erhöhung der Ausgangszugspannung um 7 N/qmm beträgt die neue tatsächliche Istzugspannung folglich 90(!)N/qmm.

Ein möglicher Einwand, dass dies aufgrund einer neu erstellten Spanntabelle nicht vorkommen kann, ist nur eingeschränkt richtig, da die Leitungsbaufirmen – auch aus Aufwands-/ Kostengründen - in vielen Fällen von der klassischen Methode der Lattensetzung Abstand nehmen

und die Regulage über eine auf mathematischem Wege ermittelte Seilverkürzung vornehmen – bei topografisch ungünstigem Gelände, bei Wald- und / oder Talüberspannungen wird diese Vorgehensweise recht häufig angewandt.

Nachfolgend ein Beispiel mit Gegenüberstellung der Ergebnisse und Auswirkungen zwischen einer Durchhangsermittlung mit der Annahme

$$\text{Umgebungstemperatur} = \text{Leiterseiltemperatur}$$

und einer Auswertung mit Berücksichtigung der ermittelten Seiltemperatur.

Der Durchhangsermittlung lagen folgende Parameter zugrunde:

- Seiltyp = Al/St 185/30
- Seilalter = 35 Jahre
- Luft-/Umgebungstemperatur = 20°C
- Windgeschwindigkeit = 1,0 m/sek
- Wind-/Seilrichtung = 20°
- Strombelastung zum Zeitpunkt der Durchhangsmessung = 480 A
- Globalstrahlung = 700 W/m² ¹⁵⁰
- Strombelastung zum Zeitpunkt der Durchhangsmessung = 480 A

gemessener Durchhang - m -	bei einer Feldlänge - m -	Daraus resultiert eine Seiltemperatur / Zugspannung und ein Seildurchhang bei ...°C von...m					
		ohne temperaturabhängige Durchhangsmessg. Seiltemperatur / σ1= N/mm ²			mit temperaturabhängiger Durchhangsmessg. Seiltemperatur / σ1= N/mm ²		
		20,0°C / 76,0	+40°C - m -	+80°C - m -	59,3°C / 85,53	+40°C - m -	+80°C - m -
9,20	280	20,0°C / 76,0	9,74	10,74	59,3°C / 85,53	8,67	9,79
18,87	400	20,0°C / 76,0	19,43	20,52	59,3°C / 80,50	18,37	19,54

Anhand dieses Vergleiches werden die grundsätzlichen Vorteile der „seiltemperaturabhängigen Durchhangsermittlung“ (rd. 1 m Differenz zwischen den errechneten Seildurchhängen) deutlich sichtbar.

6. Wirtschaftliche Aspekte des Verfahrens

Ein verbindlicher Kostenvergleich zwischen einer herkömmlichen Durchhangsmessung mit *Umgebungstemperatur = Seiltemperatur* ohne Berücksichtigung sonstiger meteorologischen Einflüssen und einer Durchhangsmessung unter Berücksichtigung aller Einflußparameter zur möglichst realitätsnahen Seiltemperaturbestimmung kann an dieser Stelle nicht erstellt werden.

Zieht man als beispielhaft Kalkulationsgrundlage die EnBW- eigene Trassierungspreisliste heran, dann liegt der Mehrpreis aktuell bei ca. **60 € pro Spannfeld mit 1-2 Stromkreisen.**

Anmerkung: Im Vortrag wurden hier fälschlicherweise 60 € pro Durchhangsermittlung angegeben, ich wurde im Nachgang von den entsprechenden Fachleuten auf diesen Fehler aufmerksam gemacht. Auf die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit nimmt diese Korrektur wesentlichen Einfluß.

In jedem Abspannabschnitt einer Freileitung ist nun pro Leiterseil eine Durchhangsmessung mit Temperaturbestimmung in einem Spannfeld dieses Abschnittes erforderlich. Mit den daraus berechneten Zugspannungen lassen sich die Durchhänge des gesamten Abspannabschnittes berechnen.

Geht man für 110 kV-Leitungen in Deutschland von einem Mittelwert von 6 Spannfeldern pro Abspannabschnitt und von einer mittleren Spannfeldlänge von 250 m pro Spannfeld und von einer durchschnittlichen Belegung der Leitungen mit 2 Stromkreisen aus, so betragen die Mehrkosten für die „seiltemperaturabhängigen Durchhangsermittlung“ :
60 € pro Abspannabschnitt mit 1,5 km Länge

= Mehrkosten von 4000 €/100km Leitungslänge.

Werden auf diesen 100 km eine einzige Umbaumaßnahme eingespart, so haben sich die Mehraufwendungen mehr als neutralisiert, jede weitere gesparte Umbaumaßnahme erhöht den Nutzen des Verfahrens zusätzlich.

Zum Vergleich beträgt der finanzielle Aufwand für eine Masterhöhung einer 110-kV-Leitung ca. 12.000-15.000 €

Bei Masterhöhungen im 220-/380-kV-Bereich verschiebt sich dieses Verhältnis weiter zu Gunsten der „seiltemperaturabhängigen Durchhangsermittlung“ da die Mehrkosten hierfür konstant bleiben, der Aufwand für Umbaumaßnahmen in diesen Spannungsebenen jedoch erheblich zunimmt.

Desweiteren ist der im normalen Betrieb nicht monetär quantifizierbare Mehrwert, verursacht durch die Bestimmung von verlässlicheren Durchhangs- / u. Zugspannungswerten zu berücksichtigen.

Referent: Dipl. Ing. El. Energietechnik Frank Reinicke

Tel: +49 (0)172 6313205

mail: swlfr@web.de