

Betrachtungen zur Messunsicherheit von Messketten

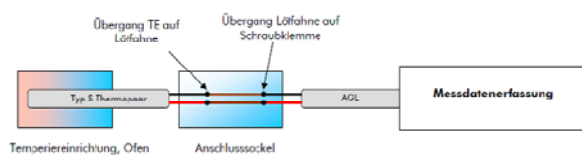
Für die neue Generation von konventionellen Kraftwerken mit Dampftemperaturen von 700 °C und darüber müssen in der Temperaturmessung neue Wege beschritten werden.

Forderungen der Betreiber nach immer höherem Wirkungsgrad, Verringerung der CO₂-Emission sowie Sicherstellung der für die Betriebserlaubnis geltenden Parameter sind nach derzeitigem Stand der Technik nur mit entsprechend angepassten Konzepten bei der Messwerterfassung zu realisieren.

Im Folgenden wird ein an der Versuchsanlage COMTES 700 erprobtes Verfahren vorgestellt.

Beim Anschluss von Thermoelementen wird an Stelle der Thermoleitung oft auf die preiswertere Ausgleichsleitung (AGL) zurückgegriffen. Diese hat in dem von der IEC 60 584-3 festgelegten Temperaturbereich weitestgehend ähnliche thermoelektrische Eigenschaften wie das entsprechende Thermoelement. Diese Eigenschaften gelten dann, wenn das Ausgleichsmaterial einzeln mit einem Thermoknoten versehen wird.

Bei der Verwendung von AGL, die an Thermoelemente angeschlossen werden, bildet sich an jedem Materialübergang ein neues Thermopaar.



Dieser Materialübergang unterliegt individuellen thermoelektrischen Eigenschaften und ist nicht fest definiert.

Das bedeutet, dass sich nicht immer die zusätzlichen Thermospannungen vom negativen und positiven Schenkel exakt aufheben. Noch größer kann der Effekt bei erhöhten Umgebungstemperaturen an diesen Übergangsstellen werden. Kommen noch Temperaturunterschiede zwischen den Übergangsstellen dazu, kann der Fehler kaum noch vorausgesagt werden.

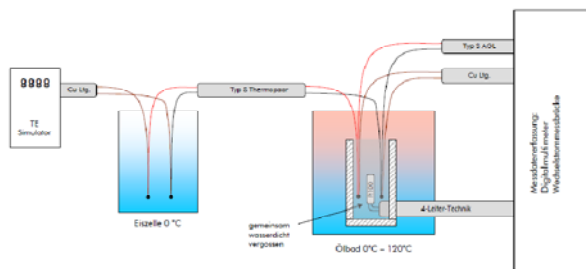
Gängige Messverfahren:

- Anschluss des Thermoelementes direkt an der Messdatenerfassung oder am Messumformer. Die Klemmentemperatur wird automatisch kompensiert.
- Anschluss des Thermoelementes an eine Kupfer (Cu)-Leitung. Diese Übergangsstelle (Vergleichsstelle – VGS) wird auf konstanter Temperatur gehalten (üblich 0 °C oder 50 °C über Vergleichstellenkompensatoren). Die Cu-Leitung wird an die Messdatenerfassung angeschlossen. Die gemessene Spannung wird bei Verwendung einer 0 °C Kompensation direkt in den Temperaturwert umgewandelt. Bei VGS-Temperaturen $\neq 0$ °C muss zuerst die der VGS-Temperatur äquivalente Spannung zu dem Messsignal hinzu addiert werden. Das Summensignal kann dann in den Temperaturwert umgerechnet werden.

Für Edelmetall-Thermopaare ist nur AGL handelsüblich und ist gem. IEC 60 584-3 auch nur in Klasse 2 verfügbar. Thermoleitung für Edelmetall-Thermopaare wird wegen des Materialpreises nur in ganz wenigen Spezialanwendungen eingesetzt.

Im Labor wurden bei Typ S-Thermoelementen (Pt10%Rh-Pt), die mit AGL als Anschlussleitung versehen waren, Einflüsse bis $> 5K$ festgestellt. Die Übergangsstelle war hierbei deutlich wärmer als 80 °C.

Wurde die Übergangsstelle gekühlt, bzw. der Prüfling so weit aus dem Ofen gezogen, dass die Übergangsstelle eine Temperatur von ca. 50 °C angenommen hatte, verringerte sich der Fehlereinfluss auf einen Wert innerhalb der zulässigen Grenzabweichung gem. DIN EN 60 584-2 für Thermoelemente. Das nachfolgende Bild zeigt schematisch den Versuchsaufbau.



Dieses Verhalten ist aber keineswegs die Regel. Es gibt auch (seltene) Fälle, bei denen nur ein sehr geringer Effekt festgestellt wurde. Im Normalfall ist stets ein nicht unerheblicher Einfluss nachweisbar. Größe, Richtung und Temperaturniveau des Einflusses ist nicht vorhersehbar, sondern von Chargenkombinationen abhängig und bleibt daher unbestimmt.

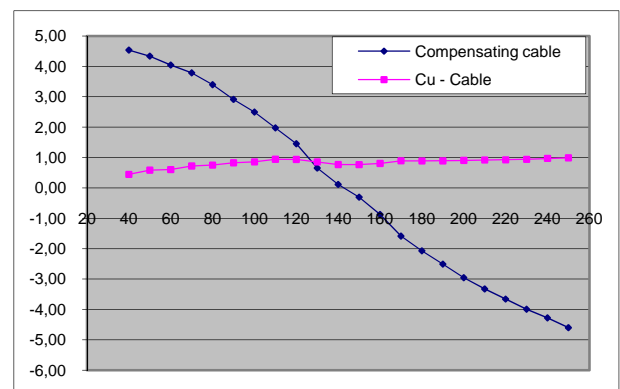
Eine weitere Methode ist im Folgenden beschrieben und wurde im realen Einsatz erprobt:

Der Anschluss des Thermoelementes erfolgt unmittelbar an eine Cu-Leitung. Die Temperatur der Übergangsstelle wird mit einem Temperatursensor (z.B. Pt 100) erfasst und entsprechend des Thermoelementtyps in eine äquivalente μV -Spannung umgerechnet. Diese wird dann zu dem Messsignal des Thermoelementeinganges hinzu addiert und anschließend in den Temperaturwert umgerechnet.

Anhand von Messreihen soll bestimmt werden, ob es zumindest für festgelegte Bauarten Möglichkeiten gibt, diesen Messfehler größenmäßig zu berechnen oder möglichst ganz auszuschließen.

Mit der ersten Versuchsreihe soll ermittelt werden, wie groß der Einfluss bei festgelegten Bedingungen ist.

Es wird angenommen, dass die Prozess-temperatur 700 °C ist. Die Übergangsstelle wurde in einem Temperaturbereich von 40 °C bis 240 °C temperiert und vermessen. Um den Einfluss von schwankenden Temperaturen an dem Thermoelement zu verringern, wird die Prozess-temperatur nicht real in einem Ofen erzeugt, sondern mit Hilfe eines präzisen Thermospannungs-Simulators vorgegeben. Somit ist dieses Signal als hinreichend konstant anzusehen. Das nebenstehende Bild zeigt schematisch den Versuchsaufbau. An dem „kalten“ Ende des Thermoelementes wurde eine AGL und eine Cu-Leitung angeschlossen. Um die Temperatur dieser Übergangsstelle exakt messen zu können, wurde noch zusätzlich ein Pt100 so nah wie möglich angebracht. Diese Elemente wurden gemeinsam vergossen. Somit können gleichzeitig der Einfluss der AGL und die Möglichkeit der Fehlerkompensation, durch Ermittlung der Übergangstemperatur mit anschließender mathematischer Verrechnung, überprüft werden.



Die Messergebnisse zeigen, dass eine geringere Messunsicherheit erreicht werden kann, wenn die Temperatur der Übergangsstelle (Vergleichsstelle) erfasst und das Messsignal des Thermoelementes entsprechend korrigiert wird.

Basierend auf den im Laborversuch und in der realen Installation gewonnenen Erkenntnissen wurde ein Messunsicherheitsbudget aufgestellt. Dabei wurde die Vorgehensweise an die im Labor übliche Praxis angeglichen. Die Zweiteilung des Unsicherheitsbudgets (1. Erfassung der „wahren“ Temperatur und 2. Ermittlung der Unsicherheit des Prüflings) wurde beibehalten. Der international anerkannte „Guide for the Estimation of Uncertainty in Measurement“, kurz „GUM“ genannt, empfiehlt dieses Verfahren. Als Unsicherheitsanteile für den/die Messumformer wurden typische Datenblattangaben der Hersteller verwendet.

Unsicherheitsanteile auf Grund des Leitsystems wurden zunächst nicht betrachtet. Bei einer Kalibrierung vor Ort wurden die Sensorsignale mittels hochpräziser Messwertgeber simuliert.

In der COMTES 700 Anlage waren je Messstelle zwei Messumformer installiert – einer für das μV -Signal des Thermoelementes und einer für die Messung der Vergleichstemperatur. Das Leitsystem musste also beide Signale messen, mathematisch miteinander verknüpfen, linearisieren und darstellen. Dabei stellte sich heraus, dass der Messfehler des Leitsystems je Eingangskanal bis zu 2 K betragen kann.

Bild 1 auf der folgenden Seite zeigt den schematischen Aufbau.

Inzwischen sind Messumformer in 2-kanaliger Ausführung verfügbar. Der eine Kanal ist für die Messung des Thermoelement-Signals zuständig, der Andere dient zur Messung der Vergleichsstelle. Die Kompensation und Linearisierung findet schon im Messumformer statt. Bei dieser Konfiguration kann von einem deutlich kleineren Gesamt-Messfehler des Leitsystems ausgegangen werden.

Bild 2 auf der folgenden Seite zeigt den schematischen Aufbau.

Auf den folgenden Seiten werden verschiedene Szenarien durchgerechnet:

1. Messeinsatz mit Edelmetall-Thermoelement Typ S, VGS als Pt 100 im Anschlusssockel eingegossen, je ein Messumformer für das μV - und Pt 100-Signal, Kompensation, Umrechnung und Darstellung im Leitsystem.
2. Messeinsatz mit Nicht-Edelmetall-Thermoelement Typ N (NiCrSi-NiSi), VGS als Pt 100 im Anschlusssockel eingegossen, je ein Messumformer für das μV - und Pt 100-Signal, Kompensation, Umrechnung und Darstellung im Leitsystem.
3. Messeinsatz mit Edelmetall-Thermoelement Typ S, VGS als Pt 100 im Anschlusssockel eingegossen, 2-kanaliger Messumformer für das μV - und Pt 100-Signal, Kompensation und Umrechnung im Messumformer, Darstellung im Leitsystem.
4. Messeinsatz mit Nicht-Edelmetall-Thermoelement Typ N (NiCrSi-NiSi), VGS als Pt 100 im Anschlusssockel eingegossen, 2-kanaliger Messumformer für das μV - und Pt 100-Signal, Kompensation und Umrechnung im Messumformer, Darstellung im Leitsystem.

Der Thermoelementtyp N (NiCrSi – NiSi) gem. DIN EN 60 584-1 ist prinzipiell ein durch Dotierung mit Silizium in beiden Schenkeln stabilisiertes Typ K-Element. Die wesentlichen Nachteile des Typs K – Short Range Ordering Effect und Drifftanfälligkeit – wurden ganz erheblich reduziert.

Allerdings sollte bei Mantelthermoelementen ein besser angepasstes Mantelmaterial an Stelle des weit verbreiteten INCONEL 600 (W.-Nr.: 2.4816) verwendet werden.

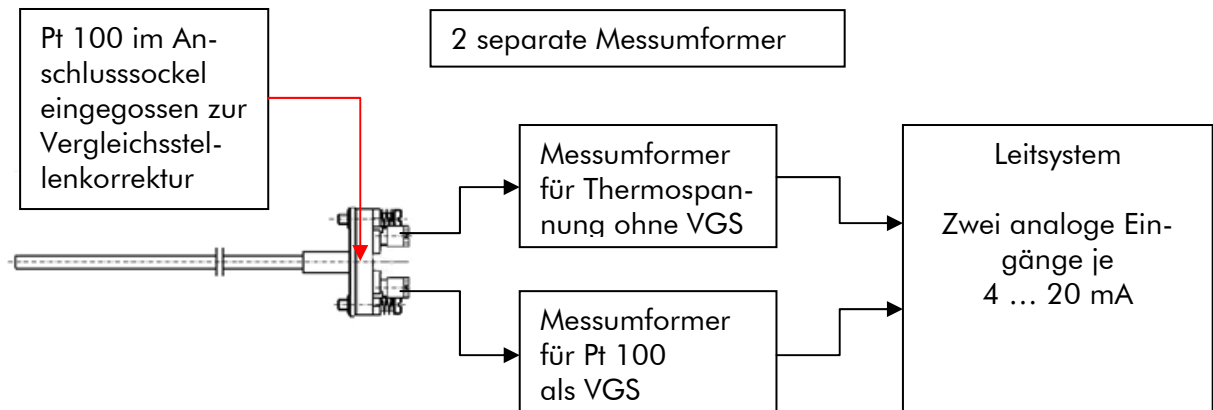


Bild 1 Messung mit 2 Messumformern

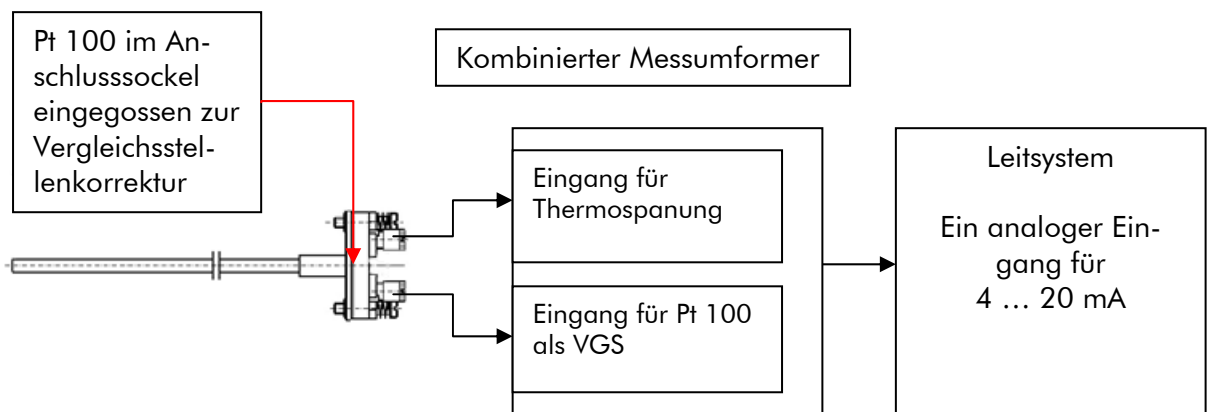


Bild 2: Messung mit kombiniertem Messumformer

Anmerkungen zu den Tabellen:

- Der obere Teil der Tabellen simuliert die Bestimmung der „wahren“ Temperatur der Temperiereinrichtung – hier der Frischdampftherperatur – unter idealen Laborbedingungen. Bei einer Vergleichskalibrierung wird das Ergebnis dieser Berechnung als Unsicherheit für die Größe X_i in die erste Zeile des unteren Teils der Tabelle übernommen. Nimmt man die Frischdampftherperatur als gegeben an – also nicht als Ergebnis einer Messung – kann die Unsicherheit von X_i zu Null angenommen werden.
- Der „Durchgriff“ dieser (gerundeten) 400 mK auf das Endergebnis beträgt rechnerisch nur 100 mK und kann somit als vernachlässigbar angesehen werden.
- X_i selbst ist der Schätzwert der Thermospannung in μV des Thermoelements bei der Messtemperatur t_s (1. Zeile des oberen Tabellenteils).
- Der Korrekturwert δv_{WE} in K ergibt sich entweder als Ergebnis einer Kalibrierung (Wareneingangsprüfung WE) und kann dann als normal verteilt angesehen werden oder als zulässige Grenzabweichung aus der DIN EN 60 584-2.

- Im letztgenannten Fall müsste eine Rechteckverteilung zu Grunde gelegt werden mit $3^{1/2} = 1,732\dots$ als Divisor.
4. $\delta_{V_{IX1}}$ steht als Korrekturwert für die Messunsicherheit des Messumformers. Dabei wurden die Wandelfehler des A/D- und D/A-Wandlers berücksichtigt. Er ist aus dem Datenblatt des jeweiligen Herstellers ersichtlich. Bei namhaften großen Herstellern kann davon ausgegangen werden, dass der Wert auf umfangreichen Messreihen mit normal verteilten Messwerten beruht.
 5. $\delta_{V_{IXd}}$ erfasst die Temperaturdrift des Messumformers (A/D- und D/A-Wandler) durch Abweichung der Betriebstemperatur von der Bezugstemperatur (normal 23 °C).
 6. $\delta_{V_{IX2}}$ ist die Grund-Messunsicherheit des Messumformers für Thermoelementmessungen. Sie ist abhängig vom TE-Typ und kann praktisch mit der Auflösung gleichgesetzt werden.
 7. δ_{V_R} enthält einen Korrekturwert für parasitäre Thermospannungen. Innerhalb des Anschlusskopfes sind mehrere verschiedene Materialien im Stromkreis vorhanden – Thermodraht auf Mantelklemme (Messing, galvanisch vernickelt) und Mantelklemme auf Cu-Draht. Obwohl innerhalb des Anschlusskopfes aus Aluminium gem. EN 50 446 eine weitgehend homogene Temperaturverteilung angenommen werden kann, sind parasitäre Thermospannungen nicht auszuschließen.
 8. $\delta_{V_{LX}}$ - Da bei Einsatz des kombinierten, 2-kanaligen Messumformers mit externer VGS keine Thermo- (TL) oder Ausgleichsleitung (AGL) verwendet wird, entfällt dieser Korrekturwert.
 9. δ_{WA} ist der Korrekturwert für den Wärmeableitfehler. Dieser gilt als minimiert, wenn die Eintauchtiefe den Wert von 20 x Außendurchmesser des Sensors überschreitet. Er kann erfahrungsgemäß nicht zu Null gesetzt werden.
 10. δ_{Hom} Systembedingt muss bei Mantelthermoelementen mit einer unvermeidbaren Inhomogenität entlang der Herstelllänge gerechnet werden. Erfahrungsgemäß ist der Wert klein, kann aber nicht zu Null gesetzt werden.
 11. $\delta_{t_{OX}}$ erfasst die Temperaturdrift des kombinierten 2-Kanal-Messumformers für die Messung der VGS durch Abweichung der Betriebstemperatur von der Bezugstemperatur (normal 23 °C). Enthalten ist auch die Abweichung des VGS-Messwiderstandes (IEC 60 751 Klasse F 0,3) bei Betriebstemperatur.
 12. Den Werten zu Grunde gelegt wurden die Datenblattangaben für einen kombinierten 2-kanaligen Temperatur-Messumformer.
 13. Für das Leitsystem (LS) wurden Angaben des Herstellers zu Grund gelegt. Es stehen zwei verschiedene Eingangsbaugruppen für 4 ... 20 mA-Signale mit unterschiedlichen Messunsicherheiten zur Verfügung. Daher wird am Ende der Tabellen die Gesamtmessunsicherheit doppelt ausgewiesen.
 14. Wird die Messstelle mit 2 Kopfmessumformern gem. Bild 1 auf Seite 4 ausgerüstet, so muss die Messunsicherheit der beiden Leitsystemeingänge als Wurzel aus der Summe der beiden Fehlerquadrate in die Gesamtbetrachtung einfließen.
Wird die Messschaltung gem. Bild 2 auf Seite 4 angewendet, so wird nur ein Eingang am LS belegt.
 15. Systematische Fehler – z.B. Abweichungen der Sensoren von der Grundwertreihe – werden in den Tabellen nicht erfasst, da sie auf Grund der Wareneingangsprüfung bekannt sind und vollkommen kompensiert werden können. Die MU-Budgets enthalten definitionsgemäß nur die statistischen Fehler.

Messunsicherheitsbudget 1: Direkte Messung - Thermoelement mit 2 Messumformern, Kompensation im Leitsystem
Bestimmung der wahren Temperatur der Messstelle

Thermoelement: Typ **S**

$$t_x = t_s (V_{IS} + C_S \cdot \delta V_{IS1} + C_S \cdot \delta V_{IS2} + C_S \cdot \delta V_R - C_S / C_{SO} \cdot \delta t_{0S} + \delta t_D + \delta t_F + \delta_{WA})$$

Größe	Benennung	Schätzwert	ME	Unsich.	ME	Verteilung	Divisor	Empfind.	ME	u _i (t)	ME
t _s	Temperatur des Normal-TE's	640	°C	0,50	K	Normal	2	1,000	1	0,250	K
δV _{IS1}	Korrektur der MU des DMM		---	3,00	µV	Normal	2	0,097	K/µV	0,145	K
δV _{IS2}	Auflösung des DMM		---	0,02	µV	Rechteck	1,732	0,097	K/µV	0,001	K
δV _R	Messstellenumschalter		---	1,00	µV	Rechteck	1,732	0,097	K/µV	0,056	K
δt _{0S}	Korrektur VGS TE		---	0,05	K	Rechteck	1,732	6,70	µV/K	0,193	K
δ _{WA}	Korrekturwert der Wärmeableitung		---	0,10	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,058	K
δ _{ID}	Drift des Thermoelements		---	0,01	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,006	K
δ _{IF}	Korrektur des Profils der Messstelle		---	0,10	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,058	K
δ _{IF}	Korrektur der Rückrechnung µV --> °C		°C	0,01	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,006	K
t _x	Temperatur der Messstelle t _s +/- u _i (t)	640	°C							0,362	K

Bestimmung der Unsicherheit des Prüflings bei der Messtemperatur

Prüfling: Mantelthermoelement Typ **S**

$$V_x = \delta V_{WE} + V_{IX} + \delta V_{IX1} + \delta V_{IX2} + \delta V_R + \delta V_{LX} + \Delta t_{CX} - \delta t_{OX} / C_{XO} + \delta_{WA}$$

MA °C	0	ME °C	700	MS °C	700
Messunsicherh. d. TE in K:			1,0	gem. WE/Norm	

Größe	Benennung	Schätzwert	ME	Unsich.	ME	Verteilung	Divisor	Empfind.	ME	u _i (t)	ME
X _i	Messwert des Prüflings bei t _s	5649,48	µV	0,36	K	Normal	1	10,33	µV/K	3,738	µV
δV _{WE}	Messunsicherheit des TE's gem. WE			1,00	K	Normal	2	10,33	µV/K	5,167	µV
δV _{IX1}	MU d. Transm. (DA-Wandler)			0,35	K	Normal	2	10,33	µV/K	1,808	µV
δV _{IXd}	Temp. Drift d. MU bei T _{Umgebung} in °C			0,59	K	Rechteck	1,732	10,33	µV/K	3,532	µV
δV _{IX2}	Grund-MU bei TE-Messung			0,95	K	Rechteck	1,732	10,33	µV/K	5,668	µV
δV _R	Parasitäre Thermospannungen (gesch.)			5,00	µV	Rechteck	1,732	1	1	2,887	µV
δ V _{LX}	Korrekturwert für TL / AGL			0,00	µV	Rechteck	1,732	1	1	0,000	µV
δ _{WA}	Korrekturwert der Wärmeableitung			0,20	K	Rechteck	1,732	10,33	µV/K	1,193	µV
δ _{Hom}	Korrektur der Inhomogenität			0,20	K	Normal	2	10,33	µV/K	1,033	µV
δ t _{OX}	Komb.MU der VGS bei Kopftemperatur	60	°C	0,65	K	Rechteck	1,732	6,70	µV/K	2,506	µV
V _x	Messwert (EMF) V _x des Prüflings bei Messtemperatur t _s +/- u _i (t _s)	5649,48	µV							10,279	µV

Ergebnistabelle	u _i (t)	ME	Erw. Fakt. k	Erweiterte MU	ME	Typ S	ME
	10,28	µV	2	20,56	µV	2,0	K

MU des Leitsystems LS je Eingang: Min. 1,2 Max. 2,1 K

Damit ergibt sich eine Gesamtunsicherheit von 3,1 K bzw. 3,6 K für die Messkette

Tabelle 1: TE Typ S, 2 Messumformer

Messunsicherheitsbudget 2: Direkte Messung - Thermoelement mit 1 Messumformer, Kompensation im Messumformer

Bestimmung der wahren Temperatur der Messstelle

Thermoelement: Typ **S**

$$t_x = t_s (V_{IS} + C_S \cdot \delta V_{IS1} + C_S \cdot \delta V_{IS2} + C_S \cdot \delta V_R - C_S / C_{SO} \cdot \delta t_{OS} + \delta t_D + \delta t_F + \delta_{WA})$$

Größe	Benennung	Schätzwert	ME	Unsch.	ME	Verteilung	Divisor	Empfind.	ME	u _i (t)	ME
t _s	Temperatur des Normal-TE's	640	°C	0,50	K	Normal	2	1,000	1	0,250	K
δV _{IS1}	Korrektur der MU des DMM		---	3,00	µV	Normal	2	0,097	K/µV	0,145	K
δV _{IS2}	Auflösung des DMM		---	0,02	µV	Rechteck	1,732	0,097	K/µV	0,001	K
δV _R	Messstellenumschalter		---	1,00	µV	Rechteck	1,732	0,097	K/µV	0,056	K
δt _{OS}	Korrektur VGS TE		---	0,05	K	Rechteck	1,732	6,70	µV/K	0,193	K
δ _{WA}	Korrekturwert der Wärmeableitung		---	0,10	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,058	K
δ _{ID}	Drift des Thermoelements		---	0,01	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,006	K
δ _{IF}	Korrektur des Profils der Messstelle		---	0,10	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,058	K
δ _{IF}	Korrektur der Rückrechnung µV --> °C		°C	0,01	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,006	K
t _x	Temperatur der Messstelle t _s +/- u _i (t)	640	°C							0,362	K

Bestimmung der Unsicherheit des Prüflings bei der Messtemperatur

Prüfling: Mantelthermoelement Typ **S**

$$V_x = \delta V_{WE} + V_{IX} + \delta V_{IX1} + \delta V_{IX2} + \delta V_R + \delta V_{LX} + \Delta t_{CX} - \delta t_{OX} / C_{XO} + \delta_{WA}$$

MA °C	0	ME °C	700	MS °C	700
Messunsicherh. d. TE in K:			1,0	gem. WE/Norm	

Größe	Benennung	Schätzwert	ME	Unsch.	ME	Verteilung	Divisor	Empfind.	ME	u _i (t)	ME
X _i	Messwert des Prüflings bei t _s	5649,48	µV	0,36	K	Normal	1	10,33	µV/K	3,738	µV
δV _{WE}	Messunsicherheit des TE's gem. WE			1,00	K	Normal	2	10,33	µV/K	5,167	µV
δV _{IX1}	MU d. Transm. (DA-Wandler)			0,35	K	Normal	2	10,33	µV/K	1,808	µV
δV _{IXd}	Temp. Drift d. MU bei T _{Umgebung} in °C			0,59	K	Rechteck	1,732	10,33	µV/K	3,532	µV
δV _{IX2}	Grund-MU bei TE-Messung			0,95	K	Rechteck	1,732	10,33	µV/K	5,668	µV
δV _R	Parasitäre Thermospannungen (gesch.)			5,00	µV	Rechteck	1,732	1	1	2,887	µV
δV _{LX}	Korrekturwert für TL / AGL			0,00	µV	Rechteck	1,732	1	1	0,000	µV
δ _{WA}	Korrekturwert der Wärmeableitung			0,20	K	Rechteck	1,732	10,33	µV/K	1,193	µV
δ _{Hom}	Korrektur der Inhomogenität			0,20	K	Normal	2	10,33	µV/K	1,033	µV
δt _{OX}	Komb.MU der VGS bei Kopftemperatur	60	°C	0,65	K	Rechteck	1,732	6,70	µV/K	2,506	µV
V _x	Messwert (EMF) V _x des Prüflings bei Messtemperatur t _s +/- u _i (t _s)	5649,48	µV							10,279	µV
Ergebnistabelle				u _i (t)	ME	Erw. Fakt. k	Erweiterte MU	ME	Typ S	ME	
				10,28	µV	2	20,56	µV	2,0	K	

MU des Leitsystems LS je Eingang: Min. 1,2 Max. 2,1 K

Damit ergibt sich eine Gesamtunsicherheit von 2,3 K bzw. 2,9 K für die Messkette

Tabelle 2: TE Typ S, 1 Messumformer

Messunsicherheitsbudget 3: Direkte Messung - Thermoelement mit 2 Messumformern, Kompensation im Leitsystem
Bestimmung der wahren Temperatur der Messstelle

Thermoelement: Typ **S**

$$t_x = t_s (V_{IS} + C_S \cdot \delta V_{IS1} + C_S \cdot \delta V_{IS2} + C_S \cdot \delta V_R - C_S / C_{SO} \cdot \delta t_{OS} + \delta t_D + \delta t_F + \delta_{WA})$$

Größe	Benennung	Schätzwert	ME	Unsch.	ME	Verteilung	Divisor	Empfind.	ME	u _i (t)	ME
t _s	Temperatur des Normal-TE's	640	°C	0,50	K	Normal	2	1,000	1	0,250	K
δV _{IS1}	Korrektur der MU des DMM		---	3,00	µV	Normal	2	0,097	K/µV	0,145	K
δV _{IS2}	Auflösung des DMM		---	0,02	µV	Rechteck	1,732	0,097	K/µV	0,001	K
δV _R	Messstellenumschalter		---	1,00	µV	Rechteck	1,732	0,097	K/µV	0,056	K
δt _{OS}	Korrektur VGS TE		---	0,05	K	Rechteck	1,732	6,70	µV/K	0,193	K
δ _{WA}	Korrekturwert der Wärmeableitung		---	0,10	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,058	K
δ _{ID}	Drift des Thermoelements		---	0,01	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,006	K
δ _{IF}	Korrektur des Profils der Messstelle		---	0,10	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,058	K
δ _{TF}	Korrektur der Rückrechnung µV --> °C		°C	0,01	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,006	K
t _x	Temperatur der Messstelle t _s +/- u _i (t)	640	°C							0,362	K

Bestimmung der Unsicherheit des Prüflings bei der Messtemperatur

Prüfling: Mantelthermoelement Typ **N**

$$V_x = \delta V_{WE} + V_{IX} + \delta V_{IX1} + \delta V_{IX2} + \delta V_R + \delta V_{LX} + \Delta t_{CX} - \delta t_{OX} / C_{XO} + \delta_{WA}$$

MA °C	0	ME °C	700	MS °C	700
Messunsicherh. d. TE in K:			1,0	gem. WE/Norm	

Größe	Benennung	Schätzwert	ME	Unsch.	ME	Verteilung	Divisor	Empfind.	ME	u _i (t)	ME
X _i	Messwert des Prüflings bei t _s	22174,85	µV	0,36	K	Normal	1	39,12	µV/K	14,149	µV
δV _{WE}	Messunsicherheit des TE's gem. WE			1,00	K	Normal	2	39,12	µV/K	19,560	µV
δV _{IX1}	MU d. Transm. (DA-Wandler)			0,35	K	Normal	2	39,12	µV/K	6,846	µV
δV _{IXd}	Temp. Drift d. MU bei T _{Umgebung} in °C			0,59	K	Rechteck	1,732	39,12	µV/K	13,371	µV
δV _{IX2}	Grund-MU bei TE-Messung			0,35	K	Rechteck	1,732	39,12	µV/K	7,905	µV
δV _R	Parasitäre Thermospannungen (gesch.)			5,00	µV	Rechteck	1,732	1	1	2,887	µV
δ V _{LX}	Korrekturwert für TL / AGL			0,00	µV	Rechteck	1,732	1	1	0,000	µV
δ _{WA}	Korrekturwert der Wärmeableitung			0,20	K	Rechteck	1,732	39,12	µV/K	4,517	µV
δ _{Hom}	Korrektur der Inhomogenität			0,20	K	Normal	2	39,12	µV/K	3,912	µV
δ t _{OX}	Komb.MU der VGS bei Kopftemperatur	60	°C	0,65	K	Rechteck	1,732	28,13	µV/K	10,523	µV
V _x	Messwert (EMF) V _x des Prüflings bei Messtemperatur t _s +/- u _i (t _s)	22174,85	µV							32,027	µV

Ergebnistabelle	u _i (t)	ME	Erw. Fakt. k	Erweiterte MU	ME	Typ N	ME
	32,03	µV	2	64,05	µV	1,6	K

MU des Leitsystems LS je Eingang: Min. 1,2 Max. 2,1 K

Damit ergibt sich eine Gesamtunsicherheit von 2,4 K bzw. 3,4 K für die Messkette

Tabelle 3: TE Typ N, 2 Messumformer

Messunsicherheitsbudget 2: Direkte Messung - Thermoelement mit 1 Messumformer, Kompensation im Messumformer

Bestimmung der wahren Temperatur der Messstelle

Thermoelement: Typ **S**

$$t_x = t_s (V_{IS} + C_S \cdot \delta V_{IS1} + C_S \cdot \delta V_{IS2} + C_S \cdot \delta V_R - C_S / C_{SO} \cdot \delta t_{OS} + \delta t_D + \delta t_F + \delta_{WA})$$

Größe	Benennung	Schätzwert	ME	Unsch.	ME	Verteilung	Divisor	Empfind.	ME	u _i (t)	ME
t _s	Temperatur des Normal-TE's	640	°C	0,50	K	Normal	2	1,000	1	0,250	K
δV _{IS1}	Korrektur der MU des DMM		---	3,00	µV	Normal	2	0,097	K/µV	0,145	K
δV _{IS2}	Auflösung des DMM		---	0,02	µV	Rechteck	1,732	0,097	K/µV	0,001	K
δV _R	Messstellenumschalter		---	1,00	µV	Rechteck	1,732	0,097	K/µV	0,056	K
δt _{OS}	Korrektur VGS TE		---	0,05	K	Rechteck	1,732	6,70	µV/K	0,193	K
δ _{WA}	Korrekturwert der Wärmeableitung		---	0,10	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,058	K
δ _{ID}	Drift des Thermoelements		---	0,01	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,006	K
δ _{IF}	Korrektur des Profils der Messstelle		---	0,10	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,058	K
δ _{tF}	Korrektur der Rückrechnung µV --> °C		°C	0,01	K	Rechteck	1,732	1,000	1	0,006	K
t _x	Temperatur der Messst. t _s +/- u _i (t)	640	°C							0,362	K

Bestimmung der Unsicherheit des Prüflings bei der Messtemperatur

Prüfling: Mantelthermoelement Typ **N**

MA °C	0	ME °C	700	MS °C	700
Messunsicherh. d. TE in K:		1,0		gem. WE/Norm	

$$V_x = \delta V_{WE} + V_{IX} + \delta V_{IX1} + \delta V_{IX2} + \delta V_R + \delta V_{LX} + \Delta t_{CX} - \delta t_{OX} / C_{XO} + \delta_{WA}$$

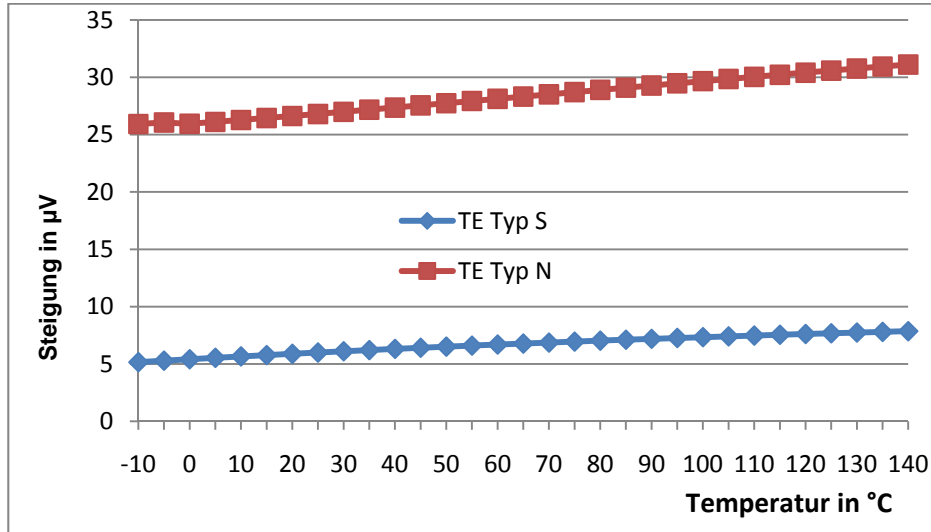
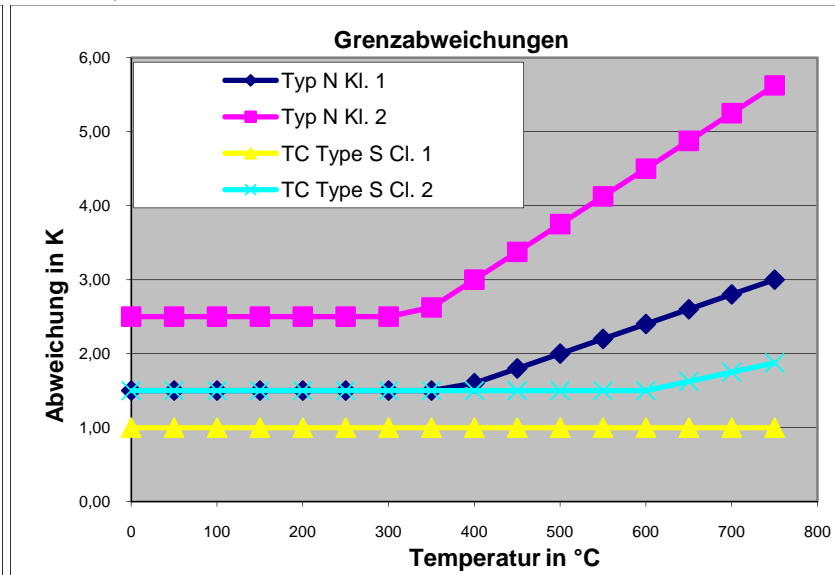
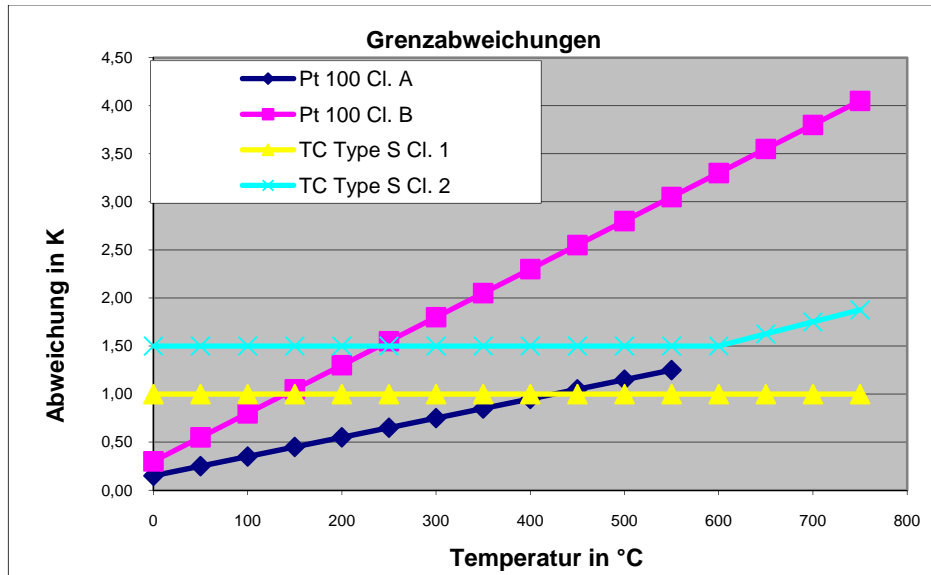
Größe	Benennung	Schätzwert	ME	Unsch.	ME	Verteilung	Divisor	Empfind.	ME	u _i (t)	ME
X _i	Messwert des Prüflings bei t _s	22174,85	µV	0,36	K	Normal	1	39,12	µV/K	14,149	µV
δV _{WE}	Messunsicherheit des TE's gem. WE			1,00	K	Normal	2	39,12	µV/K	19,560	µV
δV _{IX1}	MU d. Transm. (DA-Wandler)			0,35	K	Normal	2	39,12	µV/K	6,846	µV
δV _{IXd}	Temp. Drift d. MU bei T _{Umgebung} in °C			0,59	K	Rechteck	1,732	39,12	µV/K	13,371	µV
δV _{IX2}	Grund-MU bei TE-Messung			0,35	K	Rechteck	1,732	39,12	µV/K	7,905	µV
δV _R	Parasitäre Thermospannungen (gesch.)			5,00	µV	Rechteck	1,732	1	1	2,887	µV
δV _{LX}	Korrekturwert für TL / AGL			0,00	µV	Rechteck	1,732	1	1	0,000	µV
δ _{WA}	Korrekturwert der Wärmeableitung			0,20	K	Rechteck	1,732	39,12	µV/K	4,517	µV
δ _{Hom}	Korrektur der Inhomogenität			0,20	K	Normal	2	39,12	µV/K	3,912	µV
δt _{OX}	Komb.MU der VGS bei Kopf-temperatur	60	°C	0,65	K	Rechteck	1,732	28,13	µV/K	10,523	µV
V _x	Messwert (EMF) V _x des Prüflings bei Mess-temperatur t _s +/- u _i (t _s)	22174,85	µV							32,027	µV
Ergebnistabelle				u _i (t)	ME	Erw. Fakt. k	Erweiterte MU	ME	Typ N	ME	
				32,03	µV	2	64,05	µV	1,6	K	

MU des Leitsystems LS je Eingang: Min. 1,2 Max. 2,1 K

Damit ergibt sich eine Gesamtunsicherheit von 2 K bzw. 2,7 K für die Messkette

Tabelle 4: TE Typ N, 1 Messumformer

Die beiden folgenden Diagramme zeigen die Abhängigkeit der zulässigen Grenzabweichungen gem. den zugehörigen Normen in K bezogen auf die Temperatur. Es ist jeweils nur der positive Betrag angegeben. Der negative Betrag ist achsensymmetrisch zur Nulllinie.



Das nebenstehende Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Steigung (Seebeck-Koeffizient) der Thermoelemente Typ N (NiCrSi-NiSi) und Typ S (Pt10%Rh-Pt) von der Temperatur im Bereich von -10 bis 140 °C. Dadurch ist der Einfluss („Durchgriff“) z.B. der parasitären Thermospannung oder der Auflösung des Messumformers beim Thermoelement Typ S gegenüber dem Typ N nicht zu vernachlässigen.

Abschließende Betrachtungen

Der Sinn einer Messung ist eine vorhandene Messgröße, z.B. die Temperatur, quantitativ zu ermitteln und vergleichbar zu machen. Dazu gehört neben dem eigentlichen Messwert auch die Angabe der Messunsicherheit.

Der 1993 erschienene ISO/BIPM „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, meist kurz „GUM“ genannt, führt eine einheitliche Methode zur Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit ein. Diese Methode ist weltweit akzeptiert, eingeführt und wird erfolgreich angewendet.

In der Metrologie wird bei der Erstellung eines Messunsicherheitsbudgets nach systematischen und statistischen Abweichungen unterschieden.

Systematische Messabweichungen liegen vor, wenn unter gleichen Messbedingungen der gleiche Betrag und das gleiche Vorzeichen für die Abweichung ermittelt wird. Systematische Messabweichungen können vorhergesagt, durch Kalibrierung ermittelt und somit korrigiert werden.

Beispiel:

Eine kalibrierte Messkette hat bei 100 °C laut Kalibrierschein einen Anzeigefehler von - 0,3 K, am Einsatzort kann der Anzeigewert des Messgerätes um + 0.3 K korrigiert werden.

Bei statistischen Messabweichungen handelt es sich um zufällige Messabweichungen, die nicht korrigierbar sind. Durch eine Mehrfachmessung unter gleichen Messbedingungen kann die Größe bestimmt werden. In der Regel handelt es sich bei zufälligen Messabweichungen um eine Normalverteilung um einen Mittelwert. 68,3% aller Messwerte liegen innerhalb der einfachen Standardabweichung der Normalverteilung. Die doppelte Standardabweichung in der Normalverteilung ($k = 2$) ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 95,4%.

Systematische Messabweichungen – z.B. Abweichungen der Sensoren von der Grundwertreihe – werden in den vorstehenden Tabellen nicht erfasst, da sie auf Grund von Kalibrierungen bekannt sind und daher kompensiert werden können. Die MU-Budgets enthalten definitionsgemäß nur die statistischen Fehler.

Die Tabellen 1 und 3 entsprechen dem Messaufbau gem. Bild 1 auf Seite 4, die Tabellen 2 und 4 dem Messaufbau gem. Bild 2. Durch die unterschiedlichen Messaufbauten (zwei Messumformer oder ein Kombimessumformer), die unterschiedlichen Thermoelementtypen und die beiden verschiedenen Eingangsbaugruppen im Leitsystem ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle 5 genannten Gesamtmessunsicherheiten.

Anzahl d. Messumf.	Thermoelement Typ	Gesamtmessunsicherh. in K	
2	S (Pt10%Rh-Pt)	3,1	3,5
1	S (Pt10%Rh-Pt)	2,3	2,9
2	N (NiCrSi-NiSi)	2,4	3,4
1	N (NiCrSi-NiSi)	2,0	2,7

Tabelle 5: Gesamtmessunsicherheiten

Den Tabellenwerten zu Grunde gelegt wurden Datenblattangaben für einen kombinierten 2-kanaligen Temperatur-Messumformer. Beim Messaufbau mit zwei Transmittern wurden zwei Messumformer des gleichen Typs angenommen.

Für das Leitsystem (LS) wurden Angaben des Herstellers zu Grunde gelegt. Es stehen zwei verschiedene Eingangsbaugruppen für 4 ... 20 mA-Signale mit unterschiedlichen Messunsicherheiten zur Verfügung. Daher wird am Ende der Tabellen die Gesamt-Messunsicherheit doppelt ausgewiesen.

Wird die Messstelle mit 2 Kopfmessumformern gem. Bild 1 auf Seite 4 ausgerüstet, so muss die Messunsicherheit der beiden Leitsystem-Eingänge als Wurzel aus der Summe der beiden Fehlerquadrate in die Gesamtbetrachtung einfließen.

Wird die Messschaltung gem. Bild 2 auf Seite 4 angewendet, so wird nur ein Eingang am LS belegt.

Beide Thermoelementtypen S und N sind in der internationalen Norm IEC 584-1 und -2 (DIN EN 60 584-1 und -2) genormt. Der Typ N wird seit mehr als 30 Jahren in vielen Industriebereichen erfolgreich eingesetzt. Er gilt als der stabilste Typ unter den nicht Edelmetall-Thermoelementen.

Der Verfasser dieses Berichts ist grundsätzlich der Auffassung, dass bei Kraftwerken mit einer Frischdampf Temperatur von 600 °C und darüber, die bisherigen Wartungsintervalle von 5 Jahren zu lang sind. Präventive Wartungsmaßnahmen bzw. Rekalibrierungen im Intervall von 2 Jahren an den wenigen, sicherheitsrelevanten Messstellen im Hochtemperaturbereich lassen nach Auffassung des Verfassers einen Einsatz von Typ N-Thermoelementen dem Stand der Technik entsprechend und ökonomisch sinnvoll erscheinen.

Die Vorteile sind:

- Messunsicherheit und Auflösung des Messumformers in μV bzw. °C ist für beide TE-Typen erheblich unterschiedlich. Der Einfluss ist aber wegen der geringeren Empfindlichkeit des Typs N ($39,3 \mu\text{V/K}$ gegenüber $10,5 \mu\text{V/K}$ beim Typ S @ 640 °C) deutlich geringer.
- Der Preis per Meter Mantelkabel mit z.B. 3 mm Durchmesser beträgt für Thermoelement Typ S ~ € 350,- und für Typ N ~ € 7,50. Dabei sind keinerlei Zuschläge für Verarbeitung, Konfektionierung etc. enthalten.

- Es kann also eine größere Menge Mantelkabel aus einer Vormaterialcharge angeschafft werden. Damit kann eine gleichbleibende Qualität und Austauschbarkeit über einen langen Zeitraum gewährleistet werden.
- Mantelkabel Typ S mit INCONEL-Mantel ist nur in Klasse 2 verfügbar. Hingegen ist Mantelkabel Typ N im NiCrSi-Mantel standardmäßig in Klasse 1 verfügbar. Trotz der wertmäßig unterschiedlichen Grenzabweichung bei 700 °C gem. DIN EN 60 584-2 ($\pm 1,75 \text{ K}$ für Typ S Klasse 2, $\pm 2,80 \text{ K}$ für Typ N Klasse 1) ergibt sich per Saldo ein Vorteil zu Gunsten des Thermoelements Typ N.

Natürlich müssen auch die Nachteile betrachtet werden:

- Die Langzeitstabilität des Typs N ist geringer als die des Typs S. Definitive Aussagen hierzu sind wegen fehlender Erfahrung unter realen Kraftwerksbedingungen allerdings nicht möglich.
- Präventive Wartungsintervalle müssen kürzer angesetzt werden. Dies trifft zumindest auf sicherheitsrelevante Messkreise zu.
- Der Typ S hat seine grundsätzliche Verwendbarkeit in der COMTES 700-Installation nachgewiesen, für den Typ N steht dieser Nachweis noch aus.

Der Verfasser dieses Berichts ist seit der Akkreditierung im Jahre 1993 Kalibrierstellenleiter des Kalibrierlabors DKD-K-09701 bei der Firma CENTROCAL GmbH, einer Tochtergesellschaft des Temperatursensor-Herstellers RÖSSEL-Messtechnik GmbH in Werne.

Reinhard Klemm
 CENTROCAL GmbH, Werne
 September 2009