

Elektrochemisch polieren

Oberflächenbehandlungen von hochwertigen Edelstahlrohren für den Wärmetauschereinsatz

Verdampferanlagen nach Rohr-bündelsystem oder ähnlicher Bauweise sind prinzipiell Wärmetauscher, deren Funktion es ist, Wärmeenergie vom umgebenden Medium in das im Rohr strömende Medium zu transportieren – oder umgekehrt. Die thermodynamische Aufgabenstellung ist somit grundsätzlich das Phänomen des Wärmedurchgangs durch die Rohrwandung (Wärme-

leitung) und die beidseitig vorliegenden Grenzschichten (Wärme-konvektion). Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Vielzahl der Betriebsprobleme mit leistungsschwankenden bzw. inkrustierten Wärmetauschern in Verdampfersystemen dadurch gelöst werden können, dass die verwendeten Edelstahlrohre fachgerecht elektrochemisch poliert werden. GEORG HENKEL, BENEDIKT HENKEL

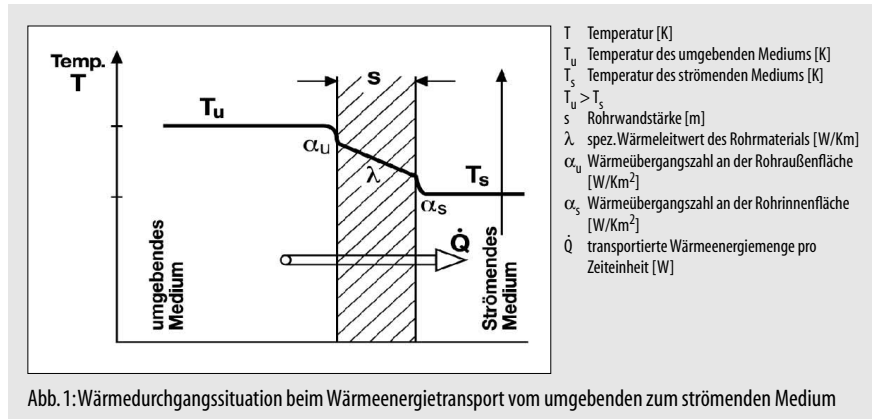


Abb. 1: Wärmedurchgangssituation beim Wärmeenergietransport vom umgebenden zum strömenden Medium

Das Rohrmaterial besteht dabei aus nahtlosen oder aber hochwertigen, längsgeschweißten Edelstahlrohren der Legierungsqualität 1.4301, 1.4404/1.4435, 1.4571, 1.4539 oder ähnlich, wobei speziell aus der Sicht der Korrosionstechnik zunehmend höherlegierte Legierungswerkstoffe Verwendung finden. Für den Wärmeenergietransport vom umgebenden zum strömenden Medium gilt somit

$$\dot{Q} = \frac{A \cdot (T_u - T_s)}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s}} = k \cdot A \cdot (T_u - T_s) \quad (1)$$

Hierbei ist $k = k(\alpha_u, s, \lambda, \alpha_s)$ die spez. Wärmedurchgangszahl des Rohrmaterials [W/m^2K], A ist dabei die Rohroberfläche [m^2]. Infolge des Transports des Rohrmediums in Rohrlängsrichtung wird die übertragene Wärmemenge \dot{Q} laufend abtransportiert, wobei gilt

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot (T_{s \text{ ausgang}} - T_{s \text{ eingang}}) \quad (2)$$

$$\dot{m} = w \cdot A_R \cdot \rho \quad (3)$$

- mit:
- m = zeitlicher Massefluss des strömenden Mediums [kg/s]
 - w = Geschwindigkeit des strömenden Mediums im Rohr [m/s]
 - A_R = Rohrquerschnitt [m^2]
 - ρ = Dichte des strömenden Mediums [kg/m^3]
 - c = spez. Wärme des strömenden Mediums [J/kgK]

- $T_{s \text{ ausgang}}$ = Temperatur des strömenden Mediums beim Rohraustritt [K]
- $T_{s \text{ eingang}}$ = Temperatur des strömenden Mediums beim Rohreintritt [K]

Die konstruktive Auslegung des Verdampfers ergibt sich damit im wesentlichen aus der Gleichung 1. Die transportierte Wärmeenergie ist gleich dem Produkt aus Verdampferoberfläche, Wärmedurchgangszahl und Temperaturdifferenz. Aus Gleichung 2 geht hervor, dass diese Wärmemenge vor allem durch die Strömungsgeschwindigkeit durch den Rohrquerschnitt abtransportiert wird. Weiter ist aus den Gleichungen zu erkennen, dass die Leistung des Wärmetauschers neben den spezifischen Größen des Rohrmaterials (zum Beispiel λ) auch von der Wanddicke s der Rohre deutlich beeinflusst wird. Die Wanddicke s wird als ein optimaler Kompromiss zwischen Wärmeleitung (möglichst kleines s) und Druckfestigkeit (möglichst großes s) zu ermitteln sein. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die tatsächlichen Betriebswerte die Richtigkeit der thermodynamischen Grundgleichungen scheinbar in Frage stellen, zumal die im Betrieb tatsächlich transportierte Wärmemenge \dot{Q} in der Zeiteinheit meist wesentlich

AUTOREN

Dr.-Ing. GEORG HENKEL
Geschäftsführer
info@henkel-epol.at

Henkel Beiz- und Elektropolieretechnik GmbH & Co. KG
Stoissmühle 2, A-3830 Waidhofen/Thaya
Fon: 0043/2842/54331-0
Fax: 0043/2842/54331-30

Dipl.-Ing. BENEDIKT HENKEL
Forschung & Entwicklung
info@henkel-epol.com

Henkel Beiz- und Elektropolieretechnik GmbH & Co. KG
An der Autobahn 12
D-19306 Neustadt-Glewe
Fon: 038757/66-0, Fax: 038757/66-122

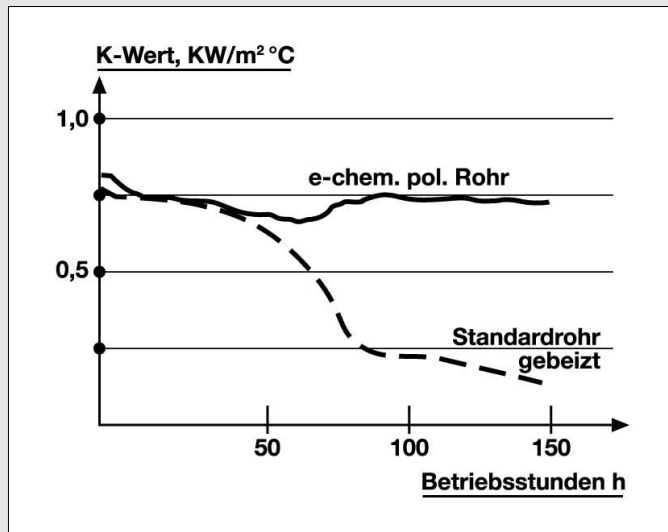


Abb.2: Verhalten des k-Wertes bei gebeizten und elektrochemisch polierten Röhren nach dem Verfahren HE110

kleiner ist als die theoretisch berechnete Größe und vor allem mit fortschreitender Betriebszeit immer kleiner wird. Die Folge dieser tendenziellen Erscheinungen sind zunächst Betriebsstörungen in Form von Kapazitätsreduzierungen bzw. zwischenzeitlichem Mehraufwand an Pumpenenergie und schließlich Stilllegung der Anlage mit entsprechendem Reinigungsaufwand des Wärmetauschers. Diese Abfolge unbequemer Erfahrungen ist vielen Betreibern von Wärmetauscheranlagen sehr bekannt.

Problemdarstellung

Die Analyse der Praxiserscheinungen zeigt, dass der bestimmende Faktor für die ungünstige Entwicklung des Wärmeenergie-

transportes hauptsächlich in der zeitlich zunehmend starken Reduzierung des Wärmedurchgangswertes k zu suchen ist, der die Leistung der Wärmetauscheranlage im wesentlichen bestimmt. Ergänzende praxisrelevante Versuche bestätigen, dass der Wärmedurchgangswert k bei einfach standardisierten Innenoberflächenausführungen der Edelstahlrohre (zum Beispiel kaltgezogen, gegläht und chemisch gebeizt, mechanisch geschliffen, Schweißnaht überarbeitet, etc.) oft schon nach wenigen Betriebsstunden drastisch abfällt. Meist werden dabei – je nach Fließmedium – Reduktionen im Wärmedurchgangswert k bis auf ein Zehntel des Anfangswertes ermittelt, wobei der Anfangswert bei metallisch blanker Oberfläche (Standardrohr gebeizt) bestimmt wird. Als Begründung für diesen Effekt hat man erkannt, dass sich mit fortschreitender Betriebszeit auf der Metalloberfläche an der Rohrinneiseite ein stetig wachsender Belag ausbildet, der aus angelegten, meist kristallisierenden Substanzen des Fließmediums besteht (Verkrustung), und der selbstverständlich für die Abnahme des Wärmedurchgangswertes k direkt verantwortlich ist (Abb. 3).

In den meisten Fällen zeigt sich die Tendenz, dass (einzelne) Rohre bei weiterer Betriebszeit völlig zuwachsen und andere zumindest deutliche Beläge (Querschnittsverengungen, Wärmeisolationsschichten) erfahren. Während die Verminderung der Wärmedurchgangszahl k und der Rohrquerschnittsfläche A_R im Anfangsstadium hinsichtlich der Betriebskontinuität durch erhöhten Energieaufwand (Wärmeangebot bzw. Erhöhung von T_u , Pumpleistung bzw. Erhöhung von w) kompensiert werden kann, bedingt ein überwiegendes Zuwachsen der Rohre, einen Anlagenstillstand und einen intensiven Reinigungsaufwand der Rohre.

Speziell bei der Inspektion nach der Reinigung der Rohre ist dabei häufig nachhaltige Rostkorrosion der Edelstahlrohroberfläche zu erkennen, wobei die Korrosionen, durch verschiedene Einflüsse begünstigt, typisch unter der belegenden Verkrustung entstanden sind. Weiter erkennt man bei mikroskopischer Prüfung der gereinigten Edelstahloberflächen bei Standardrohren auch Verkrustungsrestverunreinigungen, die praktisch als sehr aktive Keimstellen für Neuverkrustungen beim neuerlichen Anlagenbetrieb wirksam werden. Diese Problemstellen treten oft an typischen Defektstellen von Standardrohren auf :

- ▶ typische Schweißnahtdefekte in längsnahtgeschweißten Röhren wie lokale Einbrände, Poren im Nahtbereich, etc.
- ▶ typische lokale Oberflächenflitter (Doppelnungen) vom Walzband bei längsgeschweißten bzw. kalt gezogenen Röhren
- ▶ Bereiche typischer Glühfehler und Vorlage entsprechend rauher Fe-Oxidrückstände
- ▶ Bereiche von mechanischen Beschädigungen durch Kaltziehfehler
- ▶ mikroskopisch scharfe Oberflächenstrukturen durch mechanische Bearbeitungsprozesse (mech. Schleifen, Walzen, etc.)

Alle diese Defekte sind bei Standardedelstahlrohren ohne besondere Bestellkriterien typisch und häufig anzutreffen und stellen für die Verwendung als hochwertige Wärmetauscherrohre meist erhebliche Probleme dar, die im Praxisbetrieb die beschriebenen Störfälle verursachen. Aus thermodynamischer Sicht ist eine Schichtbildung in Form einer Verkrustung einfach mit einer Reduzierung des k -Wertes und damit mit einer Reduzierung des Wärmedurchgangswertes \dot{Q} in Verbindung zu bringen (Abb. 4). Im Vergleich zu Gleichung 1 und 2 bzw. 3 zeigt der Schichtaufbau der Verkrustung s_k den folgenden Zusammenhang zwischen der Schichtbildung und der Verminderung der Wärmeleistung bzw. der Verminderung des Wirkungsgrades des Wärmetauschers,

$$\dot{Q} > \dot{Q}_k = \frac{A \cdot (T_u - T_{sk})}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{s}{\lambda} + \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_s}} = k_k \cdot A \cdot (T_u - T_{sk}) \quad (4)$$

wobei vor allem infolge $\lambda_k \ll \lambda$, auch $k_k \ll k$ und auch $\dot{Q}_k \ll \dot{Q}$ wird, zumal die Schicht s_k (mit kleinem λ_k) praktisch wie eine Isolationsschicht wirkt.

Für den Wärmetransport in Rohrlängsrichtung zeigt sich aus Gleichung 2 und 3,

$$\dot{Q} = w \cdot A_R \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{s\text{ ausgang}} - T_{s\text{ eingang}}) \quad (5)$$

C.09

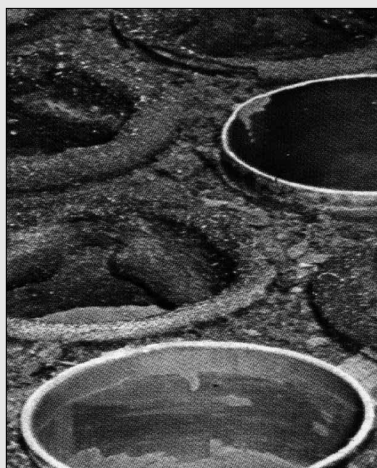


Abb. 3: Beispiel für Rohrverkrustung an der Lochplatte; die beiden verkrustungsfreien Rohre sind nach dem Verfahren HE110 elektrochemisch polierte Testrohre

$$\dot{Q} > \dot{Q}_k = w_k \cdot A_{Rk} \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{sk \text{ ausgang}} - T_{sk \text{ eingang}}) \quad (6)$$

dass für die Leistungskonstanz, also $\dot{Q}_k \approx \dot{Q}$, vor allem infolge der Reduzierung von A_{Rk} gegenüber A_R und von $(T_{sk \text{ ausgang}} - T_{sk \text{ eingang}})$ gegenüber $(T_s \text{ ausgang} - T_s \text{ eingang})$ die Strömungsgeschwindigkeit w_k gegenüber w wesentlich gesteigert werden müsste, wodurch vor allem eine deutliche Erhöhung der Pumpenleistung notwendig wird, ohne näher darauf einzugehen, dass hierdurch wiederum wesentliche Kenndaten der Anlage verändert werden, welche der Grundkonzeption der Anlage eindeutig widersprechen würden.

Belagbildung

Es ist bekannt, dass es bei der Berührung zwischen mechanisch bearbeiteten bzw. chemisch gebeizten Edelstahloberflächen und dem fließenden Medium speziell auch bei turbulenter Strömung in der strömungstechnisch beruhigten Grenzschicht grundsätzlich zu so genannten chemo-physikalischen Reaktionen von Medienpartikeln mit den Berührungsflächen kommt. Dadurch baut sich auf der Edelstahloberfläche punktförmig wachsend eine Belagschicht auf, welche dem Charakter nach eine Zwischen- oder Grenzschicht darstellt, indem sich Partikel bevorzugt verankern und sodann weitere Partikel des Mediums an sich anlagern, wodurch letztlich geschlossene Schichtenbildung entsteht.

Der Mechanismus des wachsenden Schichtaufbaus hängt neben den spezifischen Verhältnissen von Medium (Parameter)/Edelstahloberfläche vor allem auch von der Edelstahloberfläche (Topographie, Morphologie, Energieniveau) ab und kann durch entsprechende Optimierung dieser Größen in erheblichem Umfang beeinflusst und gesteuert werden. Diese Optimierung beginnt bei der richtigen Materialwahl, der exakten Spezifikation der Rohrqualität (Defektminderung durch Verfahrensangaben und Durchführung von speziellen Prüfverfahren) und der Spezifikation geeigneter Oberflächenbehandlungsverfahren/Prüfverfahren für die sensible Rohrinneoberfläche durch fachgerechtes elektrochemisches Polieren nach erprobten Verfahren.

Die Untersuchung der durch Schleifen und Polieren mechanisch bearbeiteten oder durch chemisches Beizen nachbehandelten Oberflächen des Standard-Edelstahlrohres hat gezeigt, dass sowohl nach geometrischen als auch energetischen Gesichtspunkten relativ ungünstige Verhältnisse vorliegen. Die Topographie der Oberfläche zeigt eine scharf-

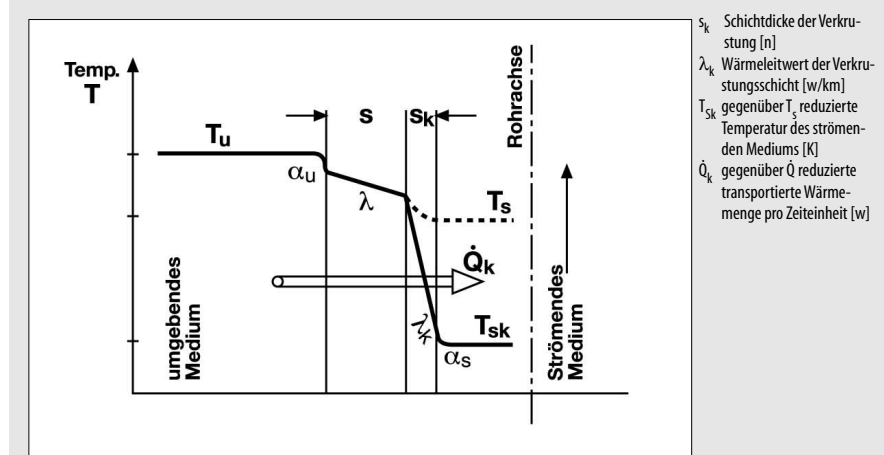


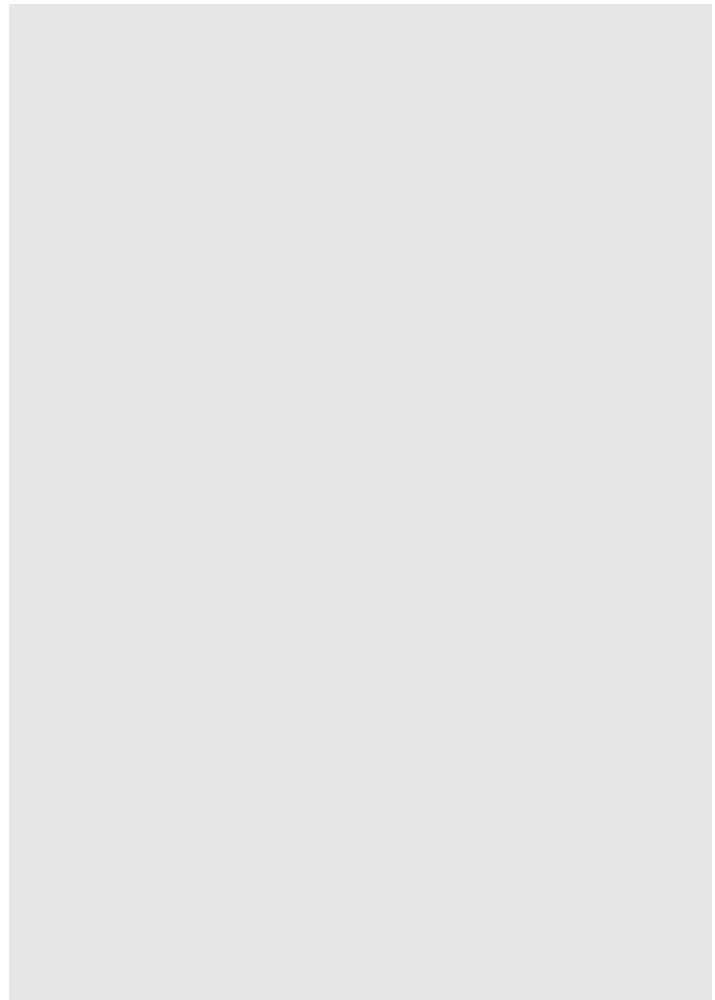
Abb. 4: Veränderte Wärmedurchgangssituation beim Wärmeenergietransport vom umgebenden zum strömenden Medium infolge Verkrustungsschicht s_k

- s_k Schichtdicke der Verkrustung [m]
- λ_k Wärmeleitwert der Verkrustungsschicht [W/km]
- T_{sk} gegenüber T_s reduzierte Temperatur des strömenden Mediums [K]
- \dot{Q}_k gegenüber \dot{Q} reduzierte transportierte Wärmemenge pro Zeiteinheit [W]

kantige bzw. zerklüftete Gebirgslandschaft, deren Struktur ein Verankern von Fremtteilen grundsätzlich unterstützt (Abb. 6a).

Die morphologische Untersuchung der Metallstruktur zeigt, dass Gefügeänderungen

infolge mechanischer Bearbeitung stattgefunden haben, wodurch eine deutliche Verschiebung des Energieniveaus der Oberfläche zu höheren Werten hin entstanden ist. Das wiederum bewirkt eine höhere Affini-



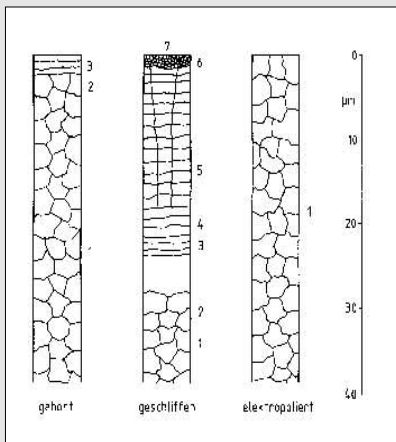


Abb. 5: Darstellung der nachteiligen Folgen von mechanischer Vorbearbeitung und Beseitigung durch elektrochemisches Polieren.

tät zur Fremdstoffanlagerung bzw. schafft Keimcharakter für die Kristallisation von Fremdstoffen aus dem strömenden Medium. Die Ergebnisse zeigen, dass die Keimbildung für das Schichtenwachstum des Belags weitgehend in der Eigenschaft der Metalloberfläche begründet liegt bzw. dass der mechanisch geschliffene oder kaltgefertigte, gebeizte Zustand der Edelstahlober-

fläche belegende Schichtenbildung begünstigt.

Abbildung 5 zeigt in klarer Weise den Einfluss der mechanischen Oberflächenbearbeitung auf die Tiefe der hierdurch veränderten Schicht. Im Vergleich dazu weist eine elektropolierte Metalloberfläche die ungestörte Struktur des Werkstoffs auf. Sie allein bietet an allen Punkten die unverfälschten Eigenschaften des Grundmaterials und garantiert eine absolute Reinheit. Damit entspricht ein elektropoliertes Werkstück auch den höchsten Forderungen aller Fertigungsbereiche der metallverarbeitenden Industrie. Gestörte Randzonen einer Metalloberfläche können verlässlich nur durch fachgerechtes Elektropolieren beseitigt werden.

Es ist ein Trugschluss, die Qualität einer Metalloberfläche durch Angabe eines Rautiefenwertes bestimmen zu wollen, denn damit wird lediglich eine quantitative Vergleichsgröße angegeben, die eine echte Vorstellung von der effektiven Oberflächengestalt nicht vermitteln kann.

Über die chemische Zusammensetzung der Verunreinigungen in der Oberfläche, über die kristalline Struktur, über Mikrorisse oder über den Spannungszustand der äußersten Schichten sagt dieser Wert ohnehin nichts aus.

Verbesserung der Oberflächenverhältnisse

Versuche, die medienberührten Edelstahloberflächen technologisch durch eine gezielte Behandlung durch elektrochemisches Polieren mit einem Abtrag von ca. 12 bis 15 µm zu verbessern, waren ausnahmslos positiv. Die Topographie der Oberflächen (Rauigkeit Ra, Rz) zeigt sich bei mikroskopischer Betrachtung (V 500- bis 3.000-fach) ideal verrundet und eingeebnet. Die mechanisch beschädigte Materialschicht ist abgetragen, wodurch das Energieniveau der Oberfläche auf ein Minimum reduziert wurde. Die vorher relativ aktive Edelstahloberfläche stellt sich nun völlig passiv dar und zeigt eine wesentlich reduzierte Neigung für die Anhaftung von Fremdsubstanzen (strukturell wie energetisch) (Abb. 6 c+d). Die chromoxidreiche Passivschicht zeigt eine gleichmäßige Dicke von ca. 1,5 bis 2 nm; das Chrom-Eisenverhältnis in der Passivschicht zeigt Werte von ca. > 1,5 : 1, wobei die Messtechniken AUGER und ESCA durchwegs gut reproduzierbare Werte zulassen.

Die praktischen Ergebnisse mit fachgerecht elektrochemisch polierten und konditionierten Edelstahloberflächen gehen konform mit den aus der Theorie zu erwartenden Auswirkungen. Der Zusammenhang zwischen dem Oberflächenzustand (Energieniveau, Rautiefe) und dem zeitlichen Verhalten der Wärmedurchgangszahl k bzw. der Belagbildung ist offensichtlich (Abb. 2). Da die Belagkeimbildung vermieden wird, ist auch ein Schichtenaufbau nicht mehr zu erwarten, bzw. in Sonderfällen nur mehr in sehr abgeschwächter Form festzustellen. Die Versuche haben durchweg gezeigt, dass fachgerecht elektrochemisch polierte Edelstahloberflächen Belagbildungen verhindern oder zumindest stark vermindern und somit wesentliche Produktionskosteneinsparungen erzielen lassen.

Abb. 6: Unterschied gebeizter und elektrochemisch polierter Edelstahloberflächen im Betrieb

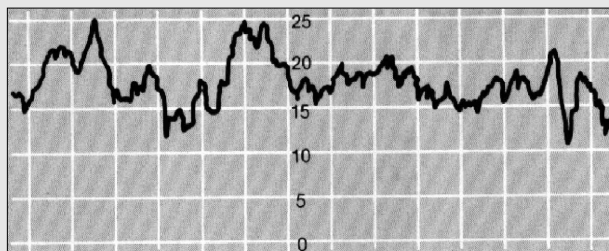


Abb. 6a: Profilkurve für die Standardoberfläche eines Edelstahlrohres 1.4404 chemisch gebeizt, Rautiefe Ra = 0,32 µm, Vergrößerung 10.000-fach

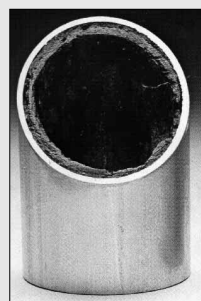


Abb. 6b: Aussehen nach 80 h Betriebszeit in einem Eindampfapparat für Zellstoffablauge

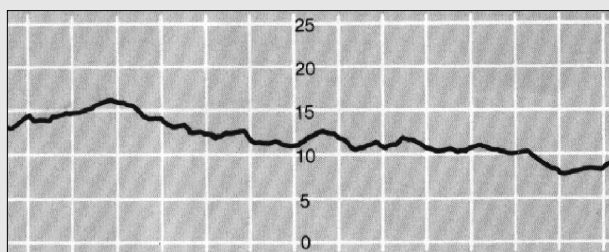


Abb. 6c: Profilkurve für ein nach Verfahren HE110, elektrochemisch poliertes Edelstahlrohr 1.4404, Abtrag 15 µm, Rautiefe Ra = 0,20 µm, Vergrößerung 10.000-fach

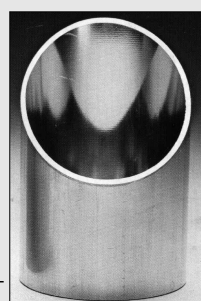


Abb. 6d: Aussehen nach 80 h Betriebszeit - frei von Verkrustungen

C.09

Beitrag als PDF per „more@click“:

PA 24.net
www.pua24.net

more@click-Code

PA4C0904 >