



## Email-Technik

email850P

email800

email350

# Elementares zur Entwicklung des Emails

Die absolute Härte aus Feuer, Wasser, Luft und Erde...

... mehr bedarf es nicht, um sichere Produktionsverfahren in sensiblen Industriebereichen zu verwirklichen: Aus Quarz, Silikaten, Borax, Kalk, Soda, Salpeter und Metalloxiden entstehen durch Schmelzen bei 1400 °C unsere Technischen Emails.

Das spezielle Mischungsverhältnis der Grundsubstanzen bestimmt am Ende die Eigenschaften des Emails wie beispielsweise Resistenz gegenüber aggressiven Medien, mechanische Festigkeit usw.

Technisches Email ist deshalb ein sehr spezieller Oberflächenschutz, den unter anderem Chemie, Pharmazie und Lebensmittelindustrie für ihre Anlagen verwenden. Rohrleitungen, Armaturen und Kolonnen von Düker lassen sich zu komplexen, unverwüsthlichen Einheiten verbinden. Dabei stehen den Anwendern alle Optionen offen: das Basisprogramm, die Konstruktion spezieller Teile oder die maßgeschneiderte Kombination aus beidem ...

# Die Eigenschaften des Emails

## Chemische Beständigkeit

Durch neue Produkte und neue Verfahren wachsen sowohl die Anwendungsbereiche als auch die Anforderungen für Chemie-Emails ständig. Wir haben diesen Anforderungen mit unseren „Technischen Emailierungen“ wie **email800**, **email350** und **email850P** Rechnung getragen.

Unsere bewährten Emails sind hochresistente Chemie-Emails, deren Eigenschaften durch Labors der Großchemie bestätigt werden. Hierzu einige Daten und Fakten:

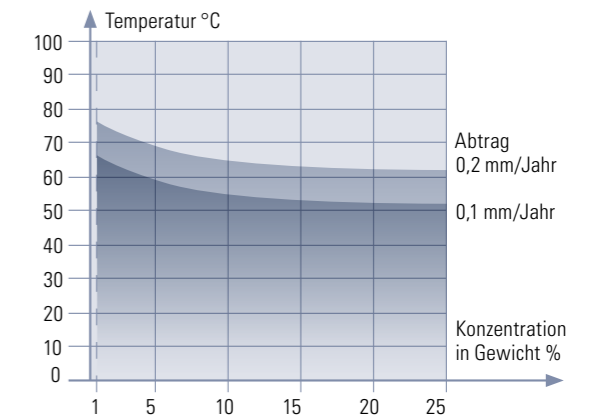
### Säurebeständigkeit:

- wird geprüft nach Abschnitt 12 von DIN EN 14483-2 – kochende Salzsäure

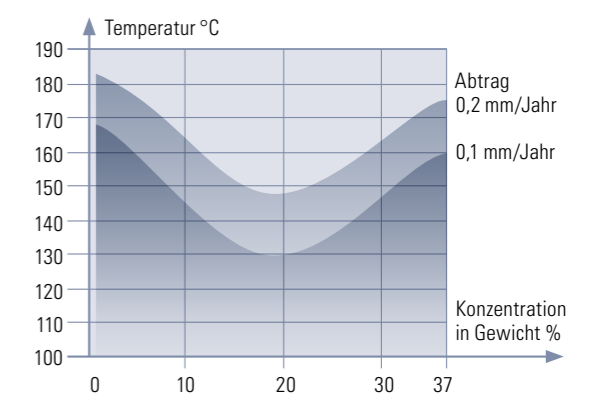
### Laugenbeständigkeit:

- wird geprüft nach Abschnitt 9 von DIN EN 14483-4 – heiße Natronlauge

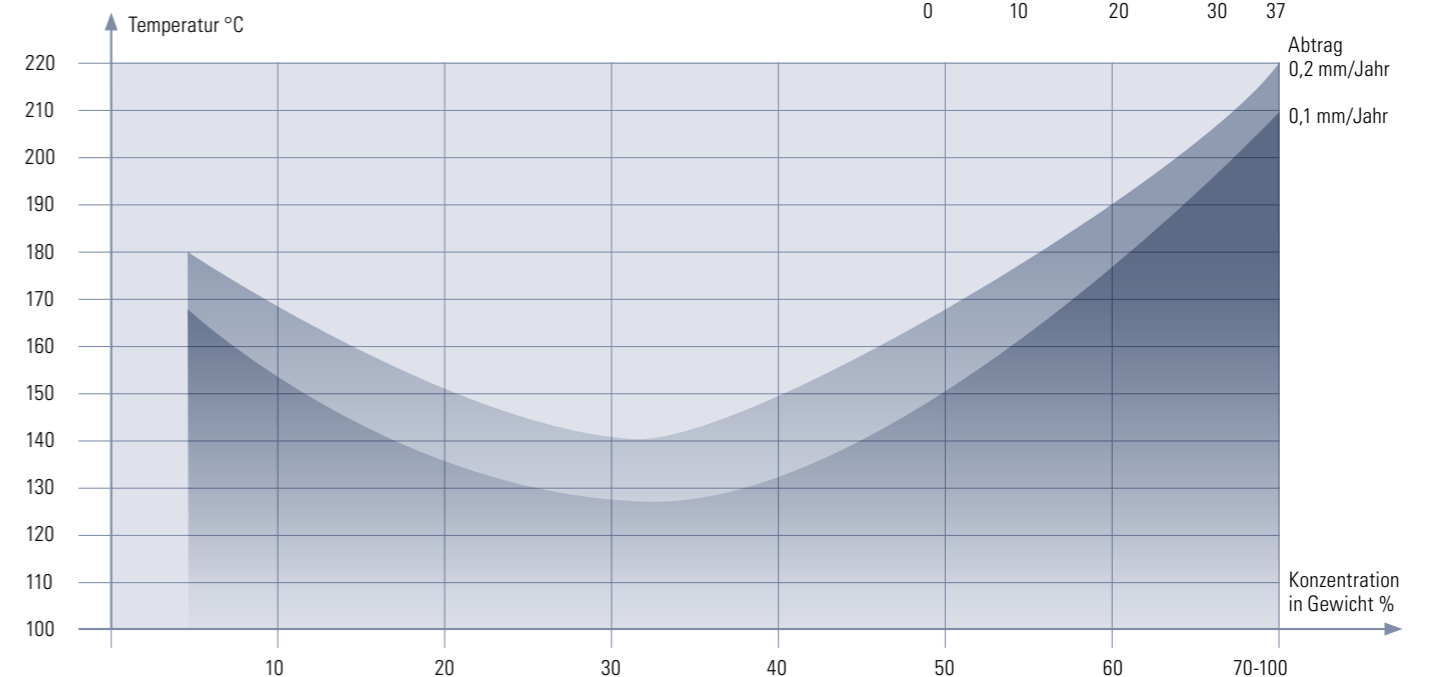
### Korrosionsgeschwindigkeit in NaOH-wässrigen Lösungen



### Korrosionsgeschwindigkeit in HCl-wässrigen Lösungen



### Korrosionsgeschwindigkeit in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-wässrigen Lösungen



# Die Eigenschaften des Emails

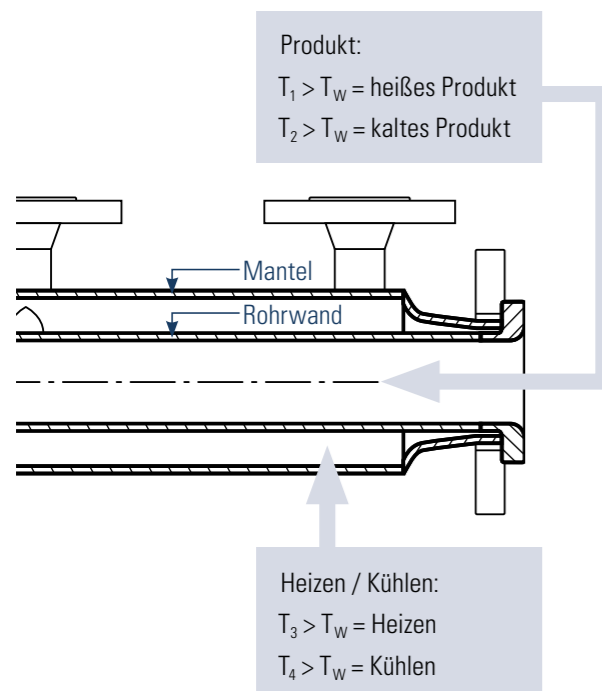
## Physikalische Eigenschaften

### Temperaturschockbeständigkeit

Die Temperaturschockbeständigkeit einer Emaillierung wird in erster Linie durch die Druckvorspannung des Emails bestimmt.

Düker **email800** hat eine Vorspannung auf Stahl von ca. 120 N/mm<sup>2</sup> bei Raumtemperatur. Sie wird erreicht durch eine entsprechende Einstellung des Ausdehnungskoeffizienten. Bei steigenden Temperaturen nimmt die Vorspannung ab, bis sie bei etwa 400 °C aufgehoben ist (siehe auch Spannungskurve).

Die Tabelle der Temperaturschockbeständigkeit emailierter Teile beinhaltet diesen Abbau. Ebenso wird die Tatsache berücksichtigt, dass das Abschrecken eines heißen Emails durch ein kaltes Produkt den gefährlichsten Schock darstellt. Überschreiten der zulässigen Temperaturdifferenzen führt zu Rissbildung und danach zu Ablplatzungen.



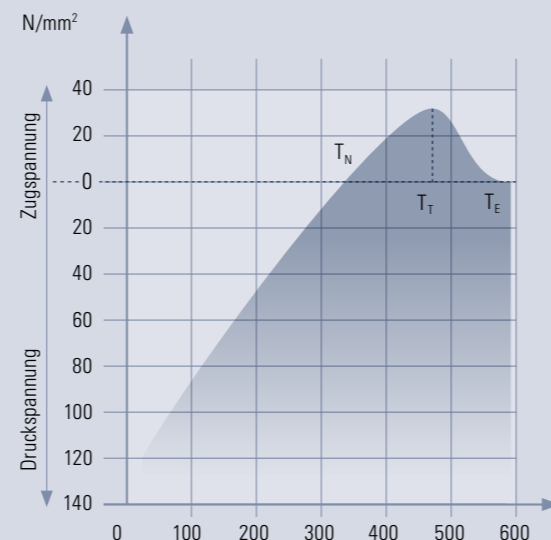
### Anwendungsbeispiele

Als Basis dient jeweils die Temperatur der emailierten Rohrwand ( $T_w$ ). Bei gegebener  $T_w$  (°C) soll die Temperatur des Produktes zwischen  $T_1$  und  $T_2$  und die Temperatur des Heiz-/Kühlmittels zwischen  $T_3$  und  $T_4$  liegen.

#### Werkstoffdaten:

- Spezifisches Gewicht 2,5 g/cm<sup>3</sup>
- Wärmeleitzahl 1,2 W/mK
- Elastizitätsmodul 80.000 N/mm<sup>2</sup>
- Druckfestigkeit  $\approx$  800 N/mm<sup>2</sup>
- Zugfestigkeit 80 N/mm<sup>2</sup>
- Elektr. Durchschlagfestigkeit 20-30 kV/mm
- Rauhtiefe (Rt) 0,05  $\mu$ m

#### Spannungskurve im Email (auf Stahl) vs. Temperatur



$T_N$  = Neutralpunkt  
 $T_T$  = Transformationstemperatur  
 $T_E$  = Erstarrungstemperatur

Rohr- wand $T_w$ °C	Heisses Produkt $T_w$ °C	Kaltes Produkt $T_w$ °C	Heizmittel $T_w$ °C	Kühl- mittel $T_w$ °C
230	250	150	250	100
220	250	140	250	90
210	250	125	250	80
200	250	100	250	70
190	250	90	250	60
180	250	75	250	50
170	250	60	250	40
160	250	50	250	30
150	250	35	250	20
140	250	20	250	10
130	250	10	250	0
120	250	0	250	-10
110	240	-10	240	-20
100	230	-20	230	-30
90	220	-30	220	-40
80	210	-40	210	-50
70	200	-50	200	-60
60	190	-60	190	-60
50	180	-60	180	-60
40	170	-60	170	-60
30	160	-60	160	-60
20	150	-60	150	-60
10	140	-60	140	-60
0	130	-60	130	-60
-10	120	-60	120	-60
-20	110	-60	110	-60
-30	100	-60	100	-60
-40	90	-60	90	-60
-50	80	-60	80	-60
-60	70	-60	70	-60

### 1. Heißes Produkt

Die Temperatur der Rohrwand beträgt 50 °C.  
**Welche Produkttemperatur darf nicht überschritten werden?**

Von  $T_w = 50$  °C waagrecht in der Tabelle zu  $T_1 = 180$  °C

### 2. Kaltes Produkt

Die Temperatur der Rohrwand beträgt 200 °C.  
**Welche Temperatur muss das Produkt mindestens haben?**

Von  $T_w = 200$  °C waagrecht zu  $T_2 = 100$  °C

### 3. Heizen

Die Temperatur der Rohrwand beträgt 20 °C.  
**Welche Heizmitteltemperatur darf nicht überschritten werden?**

Von  $T_w = 20$  °C waagrecht zu  $T_3 = 150$  °C

### 4. Kühlen

Die Temperatur der Rohrwand beträgt 180 °C.  
**Welche Kühlmitteltemperatur darf nicht unterschritten werden?**

Von  $T_w = 180$  °C waagrecht zu  $T_4 = 50$  °C

# Technisches Email

Technisches Email nimmt besonders in der Chemie- und Pharmaindustrie, aber auch in der Wasserversorgung und in speziellen Nischen des allgemeinen Maschinenbaus als Allroundwerkstoff einen festen Platz zwischen den Oberflächenwerkstoffen mit eher untergeordneten Anforderungen und den Sonderwerkstoffen mit teilweise sehr spezifischen Leistungsdaten ein.

Je nach Einsatzbereich lässt sich Email mit seinem generell breiten Funktionsprofil auf spezielle Anforderungen hin ausrichten. Ob nun in der Trinkwasserversorgung, in der Wirkstoffchemie, ob in der Abwasserbehandlung, im Lötanlagenbau, in der Pharmazie unter GMP-Bedingungen oder mit Hygienic-Design-Vorgaben – vielfältige Anforderungen mit unterschiedlichen Schwerpunkten werden durch die Verbindung der Strukturwerkstoffe mit den oberflächenbestimmenden Emailqualitäten erfüllt.



Abb. 1: Technisches Email – extrem glatte Oberflächenbeschaffenheit in Verbindung mit hohem Verschleißwiderstand gegen abrasiv wirkende Medien und hoher Korrosionsresistenz. Visuelle Prüfung der Oberfläche im Gegenlicht.

## Werkstofftypische Eigenschaften

Der Begriff Technische Emailierung kann analog zur Technischen Keramik gesehen werden. Eine Differenzierung zu Gebrauchsemails des täglichen Bedarfs – Haushalt, Schmuck etc. – erscheint sinnvoll, da bei der Technischen Emailierung die technologischen Anforderungen an die Oberfläche im Vordergrund stehen. Damit ist der Begriff festgelegt für Emailierungen in Prozessen, bei denen physikalisch und chemisch beschreibbare Belastungsbedingungen und daraus abgeleitete Anforderungen an das Oberflächensystem im Vordergrund stehen.

Die wesentlichen werkstofftypischen Merkmale der technischen Emailierung sind:

- Hohe Resistenz gegen Korrosionsangriff, insbesondere saurer Medien, auch bei höherer Prozesstemperatur
- Hoher Verschleißwiderstand gegen abrasiv wirkende Medien
- Glattheit der Oberfläche (Abb. 1)
- Gute Reinigbarkeit, keine Adhäsionsneigung
- Biologisch und katalytisch inertes Verhalten.

Unterstützt werden die Eigenschaften des Emails durch entsprechend ausgelegte konstruktive Gestaltungen, die die positiven Eigenschaften stärken und bestehende Einschränkungen nach Möglichkeit ausschließen.

## Physikochemischer Werkstoffverbund

Die Emailierung an sich zeichnet sich im Unterschied zu anderen gängigen Oberflächenbeschichtungen und Ummantelungen – Nasslacke, Pulverlacke, Kunststoffauskleidungen – u.a. durch eine intensive physikochemische Verbindung zum Grundwerkstoff aus. Sie ist gekennzeichnet durch Diffusionsprozesse aus dem Grundwerkstoff in Richtung Email und umgekehrt. Daraus bildet sich eine echte Verbundschicht in einer Dicke von einigen, je nach Werkstoffsystem auch bis zu einigen-zig Mikrometern (Abb. 2).

Durch die Lösung oberflächennaher Elemente und Verbindungen des Substratwerkstoffes in die Emailmatrix wird zunächst eine optimale Morphologie der Oberfläche zur Bildung der mechanisch/physikalischen Verbindung erzeugt.

Die mit der Anlösung der Substratoberfläche einhergehende Steigerung der Rauigkeit in Verbindung mit der Ausbildung von Hinterschneidungen bietet eine große Zahl von Ankerstellen für die mikromechanisch formschlüssige Verbindung.

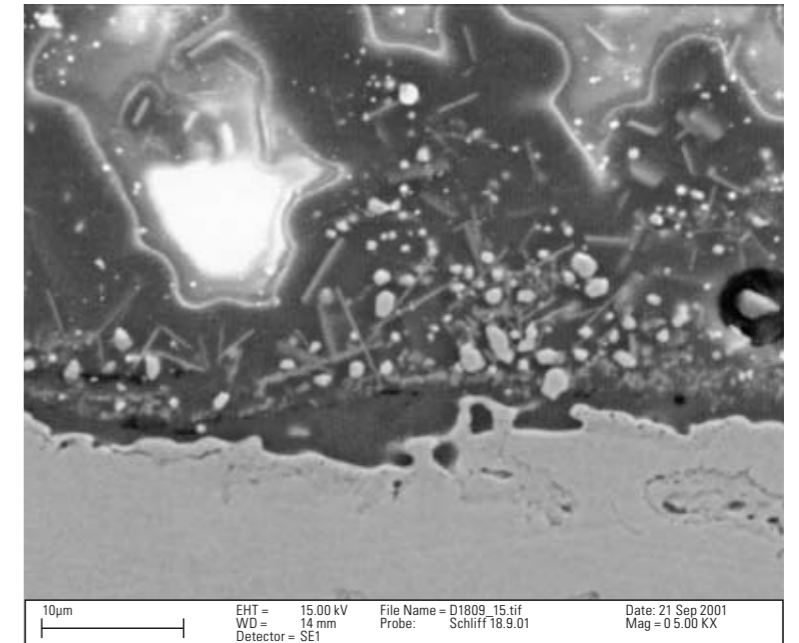


Abb. 2: Detailaufnahme einer Verbundschicht Email (hier mit Gusseisen GGG Rasterelektronenmikroskopaufnahme Fraunhofer-Institut ISC, Würzburg) in etwa 5000-facher Vergrößerung. Deutlich sichtbar die (Mikro-) Rauigkeit der Oberfläche (hell, unten) mit Hinterschneidungen. Nach oben anschließend ein dünner homogener erscheinender Saum von etwa 2 µm Dicke, weiter anschließend die eigentliche Verbundschicht von deutlich über 10 µm Dicke mit unterschiedlichen Ausscheidungen (i.W. Eisentitanatkristalle in Nadel- bzw. Plättchenform) und Einlagerungen.

Ergänzt wird dieser Mechanismus durch den Aufbau von Druckeigenspannungen des Emails im abgekühlten Zustand, die zur weiteren Stabilisierung des mechanischen Verbundes beitragen. Allerdings können zu hohe Druckspannungen in der Emailschiicht zu einer erhöhten Schlagempfindlichkeit konvexer Flächenelemente beitragen.

Neben diesen mechanisch/physikalischen Bindungsmechanismen unterstützt die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche die Ausprägung der zwischenmolekularen Bindungen. Wesentliche Wirkungen werden durch Valenz- und Van-der-Waals-Bindungen erreicht, metallische Bindungen in der Verbindungsschicht spielen in dem Eisen-Silizium-Sauerstoff-System aber ebenfalls eine Rolle.

## Aufbau und Korrosionsbeständigkeit

Die Beständigkeit hochsäurefester Emails, wie sie beispielsweise im Chemieanlagenbau eingesetzt werden, sind gekennzeichnet durch teilweise extrem hohe  $\text{SiO}_2$ -Gehalte in Verbindung mit Titanium-, Zirkonium-, Lithium- und Boroxiden. Spezielle Modifizierungen sind möglich, wenn die Laugenbeständigkeit erhöht werden muss.

Obwohl Email gegenüber wässrigen Lösungen im theoretischen Ansatz als nicht stabil gilt, sind die Abtragsraten üblicherweise – nicht Phosphor- und Flusssäure – so gering, dass von einer technischen Stabilität des Systems ausgegangen werden kann.

Beispielsweise liegt die Abtragsrate für 20%-ige HCl und 110 °C bei 50  $\mu\text{m}$  pro Jahr (entsprechend 9000 Betriebsstunden). Dem steht eine typische Schichtdicke des Deckemails von etwa 1000  $\mu\text{m}$  gegenüber. Die Abtragsraten in flüssiger Phase gehorchen in der Regel jeweils einer t-2-Beziehung (t = Zeit).

## Voraussetzungen für hochwertige Qualität

Die Qualität jeder Emaillierung hängt von einer ganzen Reihe wesentlicher Parameter und Randbedingungen ab. Die metallurgische Qualität des Grundwerkstoffes, seine Mikrostruktur, seine mechanische Vorbehandlung und seine Oberflächenbeschaffenheit sind von entscheidender Bedeutung.

So lassen sich Stähle ausschließlich mit eingeschränkter Analyse hochwertig emaillieren. Kohlenstoff, Schwefel und fast alle metallenen Begleitelementen müssen eingegrenzt sein. Sauberes, ferritisches Gefüge in der Randschicht erleichtert üblicherweise die Emaillierung. Kohlenstoffeinschlüsse behindern sie ebenso wie Mikrofehlstellen, die als Wasserstofffallen wirken können. Dies gilt generell für die Emaillierung von Eisenwerkstoffen.

Die thermisch/mechanische Vorbehandlung ist die zweite wesentliche Voraussetzung. Sauberes, abrasiv wirkendes Strahlgut reinigt die Oberfläche, aktiviert diese und vergrößert sie (Abb. 3). Im Anschluss an den Strahlvorgang muss jede Kontamination der Oberfläche vermieden werden. Daraus leitet sich die Forderung nach einem möglichst zügigen Produktionsablauf – Vorbehandlung, Auftragen des Emailslickers, Trocknung, Emailbrennen – ab.

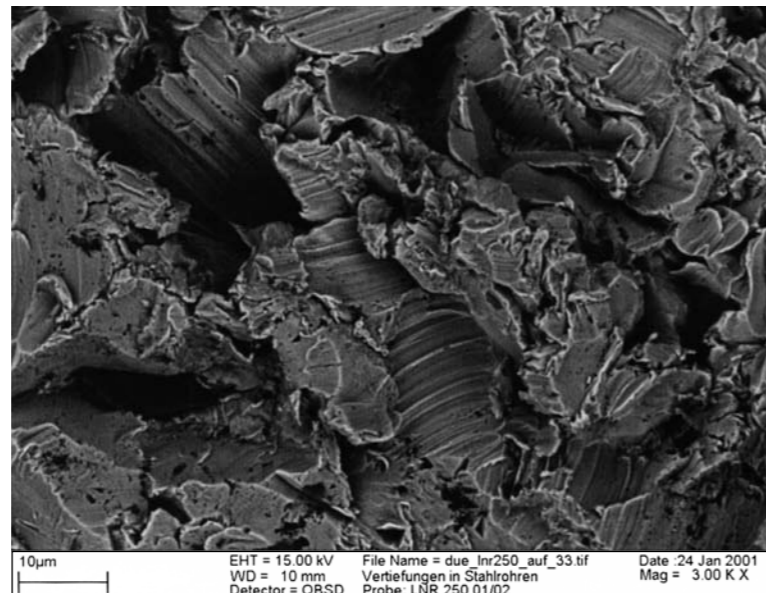


Abb. 3: Detailaufnahme einer mit Korund gestrahlten Stahloberfläche in etwa 3000-facher Vergrößerung (Rasterelektronenmikroskopaufnahme Fraunhofer-Institut ISC, Würzburg). Die Oberfläche ist durch den Strahlvorgang deutlich zerklüftet und erodiert. Sie bietet dem nachfolgenden Emaillierprozess eine ideale Voraussetzung für den Aufbau des Werkstoffverbundes.

## Abläufe während des Brennens – Chemie und Physik bei 850 °C

Während des Brennvorganges (s. a. Abb. 4) laufen unterschiedliche, temperatur- und zeitabhängige chemophysikalische Prozesse ab.

Zunächst wird die Stahloberfläche unter dem getrockneten Schlicker weiter oxydiert, unterstützt durch die Restfeuchte des getrockneten Schlickers. Wasser und Wasserstoff entweichen. Die Oxidschicht wird anschließend bei weiterer Steigerung der Temperatur durch das Email Schritt für Schritt aufgelöst. Bei diesem Schritt laufen die chemischen Haftreaktionen ab, die für die Ausbildung der Verbundzone verantwortlich sind, und es wird eine mechanische Verankerung erreicht.

Zu berücksichtigen ist, dass das Email nicht bei einer definierten Temperatur schmilzt, sondern dass der Schmelzvorgang innerhalb eines Schmelzintervalls abläuft, da die Komponenten des Emails unterschiedliche Schmelztemperaturen aufweisen. Die verschiedenen Komponenten wirken unterschiedlich auf das Lösungsverhalten der Oxidschicht und auf die Viskosität der Schmelze. Wird durch zu langes oder zu heißes Brennen die Aufnahmefähigkeit des Emails überbeansprucht, scheiden sich aus der übersättigten Emailschmelze Eisenoxide aus und führen zu Fehlern, die nicht reparabel sind (Kupferköpfe, Durchbrennen). Bei wenig gleichmäßiger Masseverteilung können die Emailfehler auch lokal begrenzt auftreten.

Den beschriebenen Abläufen und Effekten trägt die Unterscheidung in Grundemail (erste bzw. erste und zweite Schicht auf dem Bauteil) und Deckemail (anschließender Schichtaufbau bis zur angestrebten Gesamtschichtdicke) Rechnung.



Abb. 4: Bauteile nach Abschluss des Brennvorganges vor dem Ofen. Eine homogene Temperaturverteilung innerhalb des Bauteiles ist Voraussetzung für die Qualität der Emaillierung.

Das weichere, weniger resistente Grundemail ist funktional verantwortlich für die optimale Verbindung zum Grundwerkstoff. Das härtere, hochresistente Deckemail verbindet sich sehr gut mit dem Grundemail und sorgt für die angestrebten oberflächenwirksamen Eigenschaften des Gesamtverbundes.

## Beherrschte Technologie, breites Einsatzfeld

Die Technische Emaillierung ist aus werkstoffkundlicher Sicht ein klar beschreibbarer und steuerbarer Prozess. Die physikalischen und chemischen Zusammenhänge sind bekannt und bieten generell ein breites Feld an Möglichkeiten, das Zusammenspiel zwischen Grundwerkstoff und oberflächenbestimmendem Email innerhalb gegebener Grenzen optimal auf anliegende Belastungsbedingungen abzustimmen.

Neben den traditionellen Einsatzgebieten Chemieanlagenbau, Pharmazie und Wasserversorgung gewinnt die Technische Emaillierung zunehmend an Bedeutung im allgemeinen Anlagen- und Maschinenbau. Überall, wo die ausgeprägte Resistenz gegen aggressive Medien, auch bei hohen Prozesstemperaturen, in Verbindung mit der mechanischen Festigkeit gefordert sind, ist Technisches Email ein Werkstoffsystem erster Wahl.

# Mechanisches Werkstoffverhalten im Verbund

Die Emaillierung selbst ist aus werstoffkundlicher Sicht ein klar beschreibbarer und steuerbarer Prozess. Die physikalischen und chemischen Zusammenhänge sind bekannt und bieten generell ein breites Feld an Möglichkeiten, das Zusammenspiel zwischen Grundwerkstoff und oberflächenbestimmendem Email optimal auf anliegende Belastungsbedingungen abzustimmen. Die mechanischen Grenzen des Werkstoffsystems sind bekannt und sicher kalkulierbar – eine mögliche Angst vor „Spontanablösungen“ resultiert aus der fehlenden Kenntnis über die Zusammenhänge.

## Mechanisches Werkstoffverhalten

Der Einsatz emaillierter Komponenten im Maschinen- und Anlagenbau findet seine Grenzen dort, wo mit dem Versagen des Werkstoffverbundes Stahl bzw. Eisen-Email gerechnet werden muss. In vielen Fällen aber wird die Verwendung emaillierter Komponenten bereits im Vorfeld aufgrund fehlender oder mangelhafter Kenntnis der werkstoffmechanischen Zusammenhänge bei emaillierten Bauteilen ausgeschlossen.

Die Qualität einer Emaillierung lässt sich – neben anderen Prüfparametern – analog zur Farbbeschichtung durch die Haft- und Schlagfestigkeit des Emails auf dem Substratwerkstoff beschreiben. Hohe Werte stehen für einen gut ausgeprägten Werkstoffverbund und, daraus abgeleitet, für eine hohe mechanische Belastbarkeit.

Üblicherweise werden Anlagenkomponenten in ihrer Dimensionierung gegen die Streck- bzw. 0,2%-Dehnungsgrenze des Konstruktionswerkstoffes unter Berücksichtigung vorgegebener Sicherheitsbeiwerte ausgelegt. Dieser Ansatz lässt bei den typischen Werkstoffen mit ausgeprägter Duktilität geringes, örtlich plastisches Fließen zum Abbau lokaler Spannungsspitzen zu.

Die Konstruktion emaillierter Bauteile kann auf diesen Ansatz nicht zurückgreifen. Theoretisch führt eine lokale plastische Verformung des Substratwerkstoffes zu lokalem Versagen des Werkstoffverbundes, d.h. zum Absprennen des Emails. Eine rein elastische Verformung des Substratwerkstoffes erträgt die Emailsicht dagegen ohne Schaden.

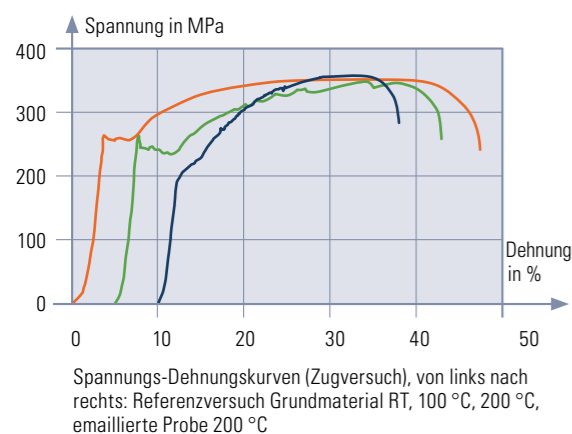
## Laborproben, Ergebnis, Bewertung

In einer Reihe von Versuchen wurden in Zusammenarbeit mit InfraServ GmbH, Frankfurt, die geschilderten Zusammenhänge praxisnah untersucht und bewertet. Es wurden zunächst Spannungs-Dehnungskurven an

- glatten, außen emaillierten Rohrproben DN 15 und
- nicht-emaillierten Proben als Referenzproben

im Zugversuch (Anlehnung Prüfnorm EN 10002) ermittelt. Die Zugversuche wurden in einer Kochsalzlösung mit angelegter Spannung zwischen dem Grundmaterial der Probe und einem Pt-Kontakt im Elektrolyten durchgeführt. Die Schädigung des Emails wurde visuell und durch den Stromfluss zwischen Probe und Pt-Kontakt detektiert.

Im Dreipunkt-Biegeversuch wurden ergänzend einseitig emaillierte Blechproben geprüft. Prüftemperaturen jeweils RT und 200 °C. Aus dem Versuch lassen sich im Ergebnis folgende Kernaussagen ableiten:



## Zugversuche

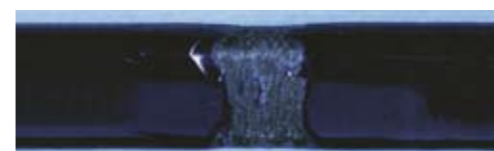
- Versagensfreie Verformung der Gesamtprobe im elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungskurve
- Erstes Versagen des Emails bei Erreichen der Streckgrenze, ca. 250 n/mm<sup>2</sup>
- Dehnungsinduziertes Versagen im Bereich der Lüdersdehnung des Grundmaterials
- Verfestigung des Grundmaterials nach kompletter Ablösung des Emails



Außen emaillierte Rohrprobe DN 15 für den Zugversuch (oben), einseitig emaillierte Flachprobe für den Dreipunkt-Biegeversuch (unten)

## Biegeversuche

- Versagensfreie Verformung im Bereich des linearen Verlaufes der Last-Durchbiegungs-Kurve
- Lokales Versagen des Emails bei Beginn der plastischen Verformung im Bereich des maximalen Biegemomentes und damit der maximalen Zugspannung (gegenüber der mittigen Krafteinleitung)
- Versagensfreiheit beiderseitig des Ortes maximaler Biegespannung (Zugseite), also im Bereich nichtplastischer Verformung



Dehnungsinduziertes Versagensbild des Emails im Biegeversuch im Bereich der plastischen Verformung (Krafteinleitung). Außerhalb der plastischen Zone, links und rechts, schadensfreie Emaillierung.

## Bauteilversuche, Ergebnis, Bewertung

Originalbauteile – mit Losflanschen verbundene Rohrenden DN 50, wie sie im Chemieanlagenbau eingesetzt werden – wurden ergänzend ebenfalls unter Zug- und Biegebeanspruchung bis zum Versagen geprüft. Unabhängig von der Belastungsart zeigten sich auch hier typische Versagensbilder, die mit den theoretischen Ansätzen und im Laborversuch durchgeführten Versuchen korrespondieren:

- Im Zugversuch kippen bei Überlast die Flanschblätter am Außenumfang beginnend ab (Stülpen). Diese plastische Verformung führt lokal zum Versagen der Emaillierung im Bereich der Überlastung.
- Im Dreipunkt-Biegeversuch kommt es zu örtlichen plastischen Verformungen im Bereich der Krafteinleitung und der Auflagepunkte. Auch hier, und nur hier, kommt die Emaillierung zum Versagen, Abplatzen.



Versuchsanordnung Dreipunkt-Biegeversuch an zwei zusammengeflanschten Rohrenden DN 50

## Schlussfolgerung

Bei der üblichen konstruktiven Auslegung von Bauteilen mit erheblicher Sicherheit gegen plastische Verformung gibt es zunächst keine verformungsbedingte Einschränkung beim Einsatz emaillierter Komponenten. Lediglich im Falle unzulässiger lokaler plastischer Verformung kommt es zu dehnungsinduzierten Schädigungen des Emails.

TE TECHNISCHES - EMAIL

KUNDENGUSS

FORMSTÜCKE UND ARMATUREN

ABFLUSSTECHNIK

ENGINEERING

Düker GmbH & Co. KGaA

Hauptstraße 39-41  
D-63846 Laufach

Tel. +49 6093 87-0  
Fax +49 6093 87-303

Internet: [www.dueker.de](http://www.dueker.de)  
E-Mail: [info@dueker.de](mailto:info@dueker.de)