

DIN 51165-1 und -2: Normung eines Prüfverfahrens für den Hydroabrasionsverschleiß emaillierter Oberflächen

Zusammenfassung

Unter Hydroabrasion versteht man den Verschleiß von Bauteilen, der durch feststoffhaltige Flüssigkeiten (Suspensionen) entsteht. Bei emaillierten Apparaten äußert sich Hydroabrasion durch lokalen, ausgeprägten Emailabtrag. Dieser lokale Emailabtrag kann die Lebensdauer des emaillierten Bauteils stark verringern.

In /1/ und /2/ sind die Grundlagen des Hydroabrasionsverschleißes in verfahrenstechnischen emaillierten Apparaten umfassend dargestellt.

Der Normenausschuss NA 062-01-63-01 UA des DIN (Deutsches Institut für Normung) hat nach vergleichender Prüfung verschiedener Verfahren zur Bestimmung des Verschleißwiderstandes von emaillierten Oberflächen beschlossen, das von THALETEC vorgeschlagene Prüfkonzept in eine DIN-Norm zu überführen. Diese Norm befindet sich derzeit im Entwurfsstadium. Erscheinungsdatum war der 21. April 2023.

(Link: <https://www.beuth.de/de/erweiterte-suche/272754!search?alx.searchType=complex&alx.search.autoSuggest=false&searchAreald=1&query=51165>)

1. Einleitung

Reibung und Verschleiß verursachen in den Industrieländern jährlich hohe volkswirtschaftliche Verluste. Darüber hinaus sind große Mengen an Energie erforderlich, um die Folgen des Verschleißes zu bekämpfen, was einen nicht zu

von
Dr.-Ing. Jürgen Reinemuth,
THALETEC GmbH, Thale

Vortrag auf der Jahrestagung des DEV in
Münster am 24. April 2023

(Die Bildrechte liegen beim Autor.)

Abstract

Hydroabrasion is the wear and tear of components caused by liquids containing solids (suspensions). In the case of glass-lined process equipment, hydroabrasion manifests itself as a local and pronounced enamel removal. This local abrasion of the enamel can reduce the working life of the glass-lined component significantly.

In /1/ and /2/ the fundamentals of hydroabrasion wear in process engineering glass-lined process equipment are comprehensively presented.

The standards committee NA 062-01-63-01 UA of the DIN (Deutsches Institut für Normung) decided, after a comparative test of different methods for determining the wear resistance of glass-lined surfaces, to convert the test concept proposed by THALETEC into a DIN standard. This standard is currently in the draft stage. Release date was April 21, 2023.

(Link: <https://www.beuth.de/de/erweiterte-suche/272754!search?alx.searchType=complex&alx.search.autoSuggest=false&searchAreald=1&query=51165>)

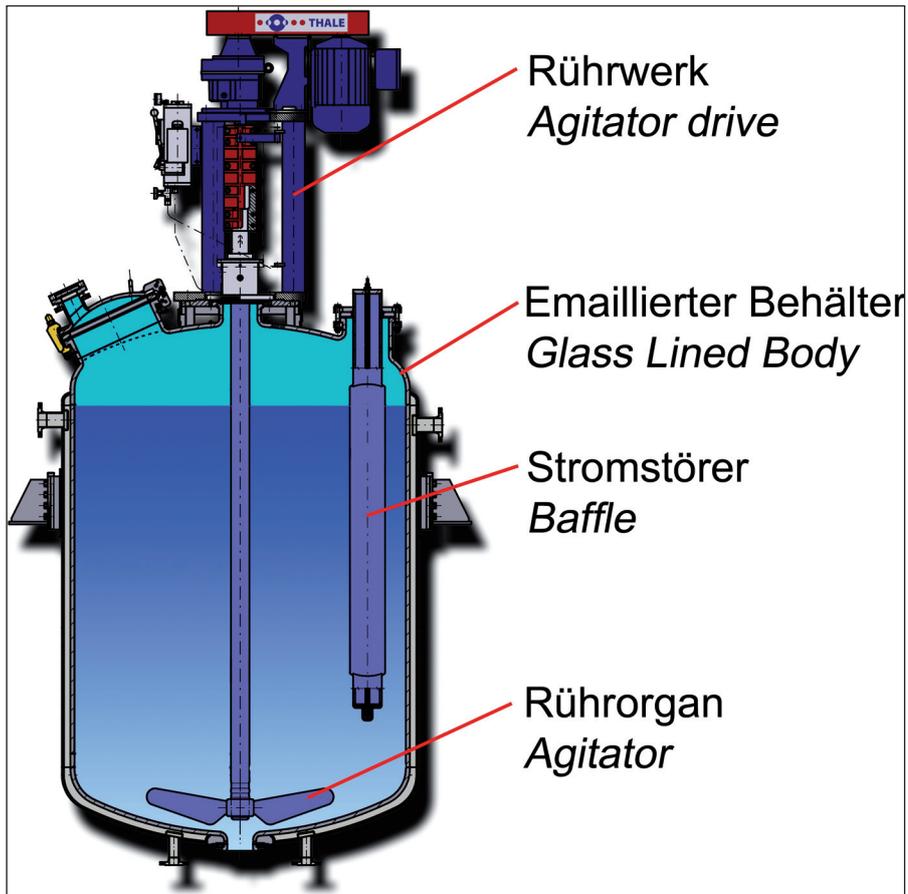
vernachlässigenden ökologischen Aspekt darstellt /3/.

Die verstärkte Berücksichtigung tribologischer Erkenntnisse kann daher zu erheblichen Einsparungen bei Energie- und Materialeinsatz, Produktion und Instandhaltung führen. Darüber hinaus werden Energie- und Rohstoffressourcen geschont, Umweltbelastungen vermieden und die Arbeitssicherheit erhöht.

Technisch emaillierte Apparate werden in der chemischen und verfahrenstechnischen Industrie zur Herstellung von Chemikalien und pharmazeutischen Wirkstoffen eingesetzt. Emaillierte Oberflächen sind hochbeständig gegen starke Säuren, glatt, antiadhäsiv und daher leicht zu reinigen. Darüber hinaus stellen emaillierte Apparate in vielen Fällen eine besonders wirtschaftliche Lösung im Vergleich zu Apparaten aus hochlegierten Edelstählen oder Werkstoffen wie Nickelbasislegierungen und Tantal dar.

Insbesondere wenn wesentliche Legierungselemente wie Nickel und Chrom, die für korrosionsbeständige Werkstoffe in großen Mengen benötigt werden, sehr teuer sind, ist ein technisch emaillierter Apparat oft die deutlich wirtschaftlichere Alternative.

Technisch emaillierte Rührwerke haben daher in einer Vielzahl von verfahrenstechnischen Prozessen ihren festen Platz und bilden oft das „Herz“ der Prozesse. Dabei kommt es auf höchste Verfügbarkeit und Langlebigkeit an. Aufgrund des hohen Gefährdungspotenzials der in den



tiert sind. Mit Hilfe einer Wellendichtung wird die Rührwelle druckdicht gegen den Rührbehälter abgedichtet.

Der Abtrag des Emails in emaillierten Rührbehältern wird im Wesentlichen durch folgende Mechanismen hervorgerufen:

- Korrosion des Emails
- Abtrag der Oberfläche infolge der Wechselwirkung mit den Feststoffen in feststoffbeladenen, bewegten (gerührten) Flüssigkeiten, die sogenannte Hydroabrasion /4/
- Emailabtrag infolge anderer Mechanismen, z.B. Kavitation.

3. Hydroabrasion im emaillierten Rührwerksapparat

Betrachtet man das Rühren feststoffhaltiger Medien in einem emaillierten Rührwerksapparat genauer, so bietet es sich an, das System als tribologisches System aus mehreren Elementen zu definieren. Bei gerührten feststoffhaltigen Fluiden stellt sich das tribologische System demnach gemäß **Abbildung 2** dar.

Apparaten verarbeiteten Medien ist es zudem wichtig, Schäden durch Korrosion oder Verschleiß möglichst zu vermeiden.

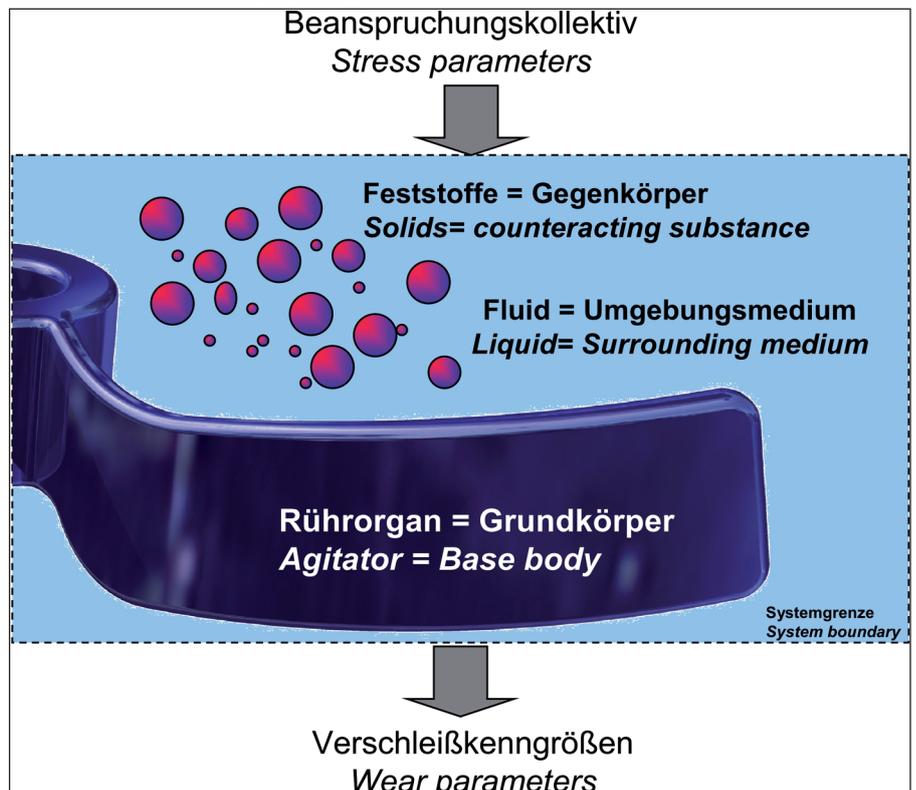
2. Abtragsmechanismen bei emaillierten Oberflächen von Rührwerksapparaten

Hydroabrasiver Verschleiß tritt bei emaillierten Rührwerksapparaten hauptsächlich an den umströmten Bauteilen auf.

Ein emaillierter Rührwerksapparat besteht aus einem Behälter mit entsprechendem Volumen. Heute können Apparate mit Volumina bis zu 100 m³ hergestellt werden. Im Durchschnitt liegen die Apparategrößen heute zwischen 10 m³ und 25 m³. Über dem so genannten Rührwerksstutzen in der Mitte des oberen Bodens eines Rührbehälters befindet sich das Rührwerk. Ein Elektromotor treibt über ein Getriebe die in den Behälter ragende Rührwelle an, auf der wiederum die Rührorgane mon-

Abbildung 1 (oben): Aufbau eines emaillierten Rührwerksapparates

Abbildung 2 (unten): Tribologisches System beim Rühren feststoffhaltiger Flüssigkeiten



Dabei stellt die emaillierte Oberfläche (Behälterwand, Rührorgan) den Grundkörper, die Feststoffe im Fluid den Gegenkörper und das feststoffbeladene Fluid das Zwischenmedium bzw. das Umgebungsmedium dar. Zwischen den beteiligten Körpern ist zudem eine Relativbewegung erforderlich, damit Verschleiß entsteht.

3.1 Schadensorte

Wie bereits beschrieben, ist Hydroabrasion ein Mechanismus, der im Wesentlichen durch die Relativbewegung zwischen den medienberührten Oberflächen des emaillierten Apparates und den im Fluid mitgeführten bzw. suspendierten Feststoffen hervorgerufen wird. Die mit dem feststoffbeladenen Fluid in Berührung kommenden Oberflächen sind daher von hydroabrasivem Verschleiß bedroht. Schäden durch Hydroabrasion sind immer lokal begrenzt und konzentrieren sich auf wenige Stellen im emaillierten Rührorgan. Bei emaillierten Rührbehältern sind dies im Wesentlichen:

- die Spitzen und den in Drehrichtung gerichteten Kanten der Rührerflügel
- die angeströmten Flächen sowie den angeströmten Kanten der Stromstörer
- die Seitenwand des Apparates auf der Höhe der Rührorgane
- der Behälterboden, vorwiegend unterhalb des Rührers
- die der Wand des Apparates im Bereich der Flüssigkeitsoberfläche, insbesondere dann, wenn aufschwimmende Feststoffe die Flüssigkeitsoberfläche bedecken
- der Bereich der Aushalsungsradien am Bodenauslaufstutzen.

Die Schäden treten daher bevorzugt an Stellen auf, an denen aufgrund der Strömung im Apparat durch Rühren oder druckunterstütztes Entleeren hohe lokale Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Schäden infolge Hydroabrasion sind auch an Stellen zu erwarten, an denen die Strömung aufgrund der Geometrie der umströmten Bauteile stark und abrupt

umgelenkt wird. Schließlich können Stellen betroffen sein, an denen abrupte Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit des feststoffbeladenen Fluids auftreten.

3.2 Charakteristisches Schadensbild

Das Schadensbild der hydroabrasiv

geschädigten Emailoberflächen weist einige charakteristische Merkmale auf. Wie oben beschrieben, ist die Schädigung lokal begrenzt. Darüber hinaus kommt es in der Regel zu einem Emailabtrag, der kontinuierlich zunimmt und im Bereich der maximalen Schädigung teilweise bis



Typischer Abrasionsschaden an einem Rührer

Abbildung 3: Verschleißschaden an einem emaillierten Rührorgan /5/

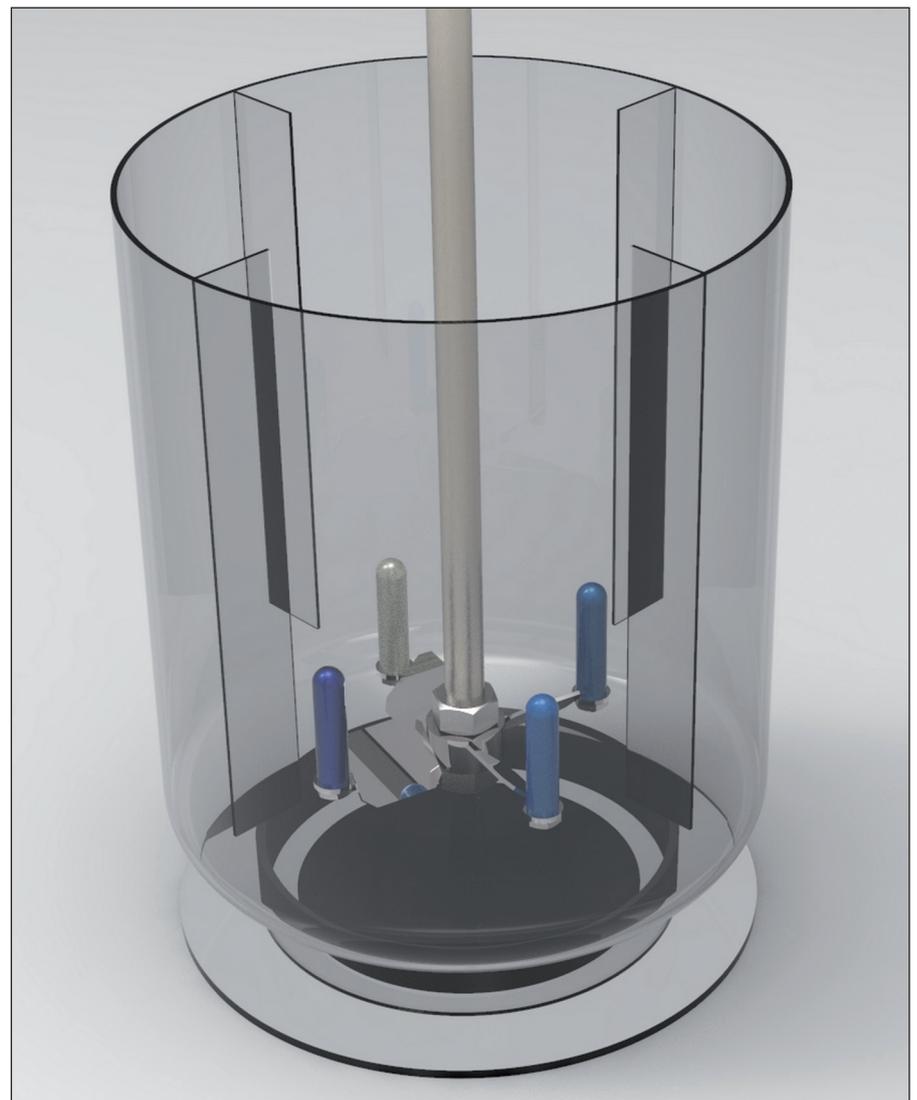


Abbildung 4: Versuchsaufbau für Hydroabrasionsversuche (Behälter transparent dargestellt)

an die Oberfläche des darunter liegenden Stahlbauteils reicht.

Ist der Prozess nicht sehr korrosiv, setzt sich die hydroabrasive Schädigung mit verminderter Geschwindigkeit auf der freigelegten Stahloberfläche fort. Bei starker Stahlkorrosion kommt es jedoch in der Regel sofort zu weiteren Schädigungen (Emailabplatzungen durch Unterwanderung des „gesunden“ Emails um die Schadstelle herum bis hin zum Durchbruch), so dass die Schadensursache in der Regel nicht mehr erkennbar ist. In diesem Fall ist es erforderlich, weitere Bauteile oder andere Stellen desselben Bauteils auf das hydroabrasionstypische Schadensbild hin genau zu untersuchen.

Sofern nur eine hydroabrasive Beanspruchung auf das emaillierte Bauteil einwirkt, ist der Bereich der hydroabrasiven Schädigung besonders gut erkennbar, da in diesen Bereichen die Emaillierung aufgeraut ist, während die übrigen Oberflächen noch den sogenannten „Feuerglanz“ aufweisen.

4. Untersuchung des Hydroabrasionswiderstands emaillierter Oberflächen

Um die Hydroabrasionseigenschaften emaillierter Oberflächen zu untersuchen, wurde von THALETEC ein Hydroabrasionsprüfstand konzipiert. Die Entwicklung des Prüfstandes war mit folgenden Einzelzielen verbunden:

- Schaffen einer einfachen Möglichkeit zum quantitativen Vergleich der Verschleißbeständigkeit verschiedener Oberflächen unter definierten, schleißenden Bedingungen in feststoffbeladenen Fluiden mit einem Feststoffgehalt bis zu 50%.
- Praxisnahe Simulation von hydroabrasiven Verschleißbedingungen (Fluid, Feststoff im Rührprozess) und als Grundlage für das Ableiten von Lebensdauer-Aussagen emaillierter

Oberflächen für konkrete Kundenanwendungen

- Schaffen von Grundlagen zur Weiterentwicklung von Emails im Hinblick auf deren Verschleißfestigkeit unter hydroabrasiver Beanspruchung
- Erarbeitung von Grundlagen zur Festlegung eines normungsfähigen, standardisierten Prüfverfahrens für emaillierte Oberflächen bezüglich Verschleißfestigkeit unter hydroabrasiven Betriebsbedingungen.

4.1 Versuchskonzept

Das Verschleißtopfverfahren nach /4/ wurde für die Simulation von Hydroabrasivverschleißvorgängen in Rührbehältern modifiziert (**Abbildung 4**).

Ein Behälter aus Stahl ist mit vier Wandstromrührern ausgerüstet. Um den Verhältnissen in Rührbehältern möglichst nahezukommen, ist der Behälterboden als Klöpperboden nach DIN 28011 ausgeführt. Wie beim emaillierten Rührwerk ist eine Welle konzentrisch zur Behälterachse angeordnet. Am Ende der Welle ist ein vierflügeliger 45°-Schrägblattrührer befestigt. Am Ende jedes Rührflügels befindet sich eine Halterung, in die jeweils eine Probe eingeschraubt werden kann. Zur Bestimmung des Emailabtrags wird ein

Schichtdickenmessgerät verwendet. Um die Emailsichtdicke reproduzierbar an immer der gleichen Stelle der Probekörper zu ermitteln, steht eine Messschablone zur Verfügung. Um Messfehler und andere Abweichungen zu minimieren, werden bei jedem Versuch immer vier Probekörper eingebaut und die Messwerte über die jeweiligen Messpunkte sowie über die Probekörper gemittelt. Als Feststoff hat sich Siliciumcarbid mit einer mittleren Korngröße von 50 μm , einer Dichte von 3.210 kg/m^3 und einer Mohs-Härte von 9 als besonders geeignet erwiesen. Bei einer Füllmenge von 20 l Wasser werden 2 kg Siliciumcarbid zugegeben (10 % Gewichtsanteil bezogen auf die Flüssigkeitsmenge).

Durch die Anordnung der Prüfkörper in konstantem Abstand zur Rührwelle ergeben sich zumindest nominell gleiche Geschwindigkeiten entlang der Prüfkörperachse. Auch bei an sich konstanter Geschwindigkeit an der angeströmten Probenseite (wtip) ist der Emailabtrag entlang der Probenlängsachse dennoch nicht konstant. Vielmehr tritt der stärkste Verschleiß am (oberen) Ende des Probekörpers im Übergangsbereich von der zylindrischen Form zur halbkugelförmigen Spitze auf.



Abbildung 5: Verschlissene, angeströmte Seite des einen Probekörpers mit inhomogenem Emailabtrag. Der größte Emailabtrag findet am Beginn der Kuppe des Probekörpers statt.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass Emailabtrag ausschließlich auf der Anströmseite des Probekörpers auftritt. (Abbildung 5). Während das Email auf der angeströmten Seite matt und verschlissen erscheint, weist das Email des Probekörpers auf der Rückseite noch den ursprünglichen Feuerglanz auf.

Abbildung 6 zeigt den gemessenen Emailabtrag entlang der angeströmten Hauptachse eines Probekörpers an drei Messstellen. Messstelle 1 befindet sich an der oberen Kuppe des Probekörpers, Messstelle 2 in der Mitte des zylindrischen Bereichs des Probekörpers und Messstelle 3 in der Nähe der Befestigung des Probekörpers am Probenhalter. Um den Messvorgang zu vereinfachen und sicherzustellen, dass bei jeder Messung die Emailsichtdicke mit einem Schichtdickenmessgerät immer wieder an der selben Stelle ermittelt wird, wurde eine Schablone in Form einer Hülse angefertigt, in der die Messstellen durch Bohrungen festgelegt sind. Gut erkennbar ist in dem Diagramm zum einen der über der Zeit lineare Verlauf des Emailabtrags. Zum anderen kann festgestellt werden, dass, wie oben schon dargestellt, der Emailabtrag im Bereich der Kuppe am größten und im Bereich der Einspannung am geringsten ist.

Bei den Messwerten in **Abbildung 6** handelt es sich um die Darstellung einer Einzelmessung. Für alle weiteren Messungen werden jeweils die Mittelwerte aller Messungen dieser Konfiguration verwendet. Hierbei handelt es sich in der Regel um mindestens zwei oder drei Messungen pro Drehzahl und Probekörper. Wobei sich ein Wert aus der Mittelung der Messungen von zwei Probekörpern ergibt.

5. Überführung in eine Deutsche Norm 51165-1 und -2

Das beschriebene Verfahren bewährte sich bei THALETEC bei der internen Prü-

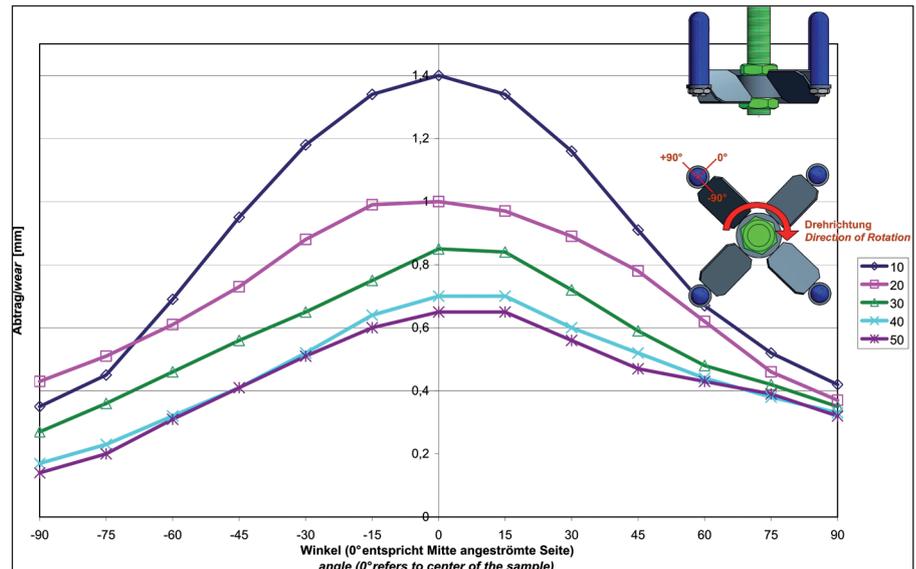


Abbildung 6: Emailabtrag in Abhängigkeit von der Messstelle am Probekörper für einen ausgewählten Emailtyp unter gegebenen Versuchsbedingungen

fung technischer Emailierungen bezüglich der Verschleißbeständigkeit über Jahre. Auf der Grundlage dieses Prüfverfahrens konnten Technische Emails hinsichtlich deren Eignung für abrasive chemische Verfahren einfach und verlässlich ausgewählt und empfohlen werden.

Die von THALETEC durchgeführten Arbeiten hinsichtlich

- Versuchskonzeption
- Reproduzierbarkeit der Messergebnisse
- Versuchsablauf
- Versuchsauswertung

führten letztendlich dazu, dass sich der Arbeitsausschuss NA 062 01 63 AA „Prüfung von Emails und Emailierungen“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP) entschied, das von THALETEC vorgeschlagene Konzept zunächst mit anderen Verschleißmessverfahren für emailierte Oberflächen zu vergleichen.

Nach umfangreichen Untersuchungen im Hause der Fa. Bayer entschied der Ausschuss, dass Aussagen bezüglich der Verschleißfestigkeit emailierter Oberflächen in verfahrenstechnischen Prozessen mittels des von THALETEC vorgestellten Konzeptes am besten und mit höchster Aussagefähigkeit als Normvorschlag

umgesetzt werden sollte. Seitens des DIN erfolgte dann die Initiierung des formalen Normungsprozesses, welcher in die Erarbeitung der DIN 51165 mündete.

In Analogie zur Literatur in /6/ und /7/ ist die DIN 51165 in zwei Teile gegliedert:

- Teil 1 mit dem Titel „Emails und Emailierungen – Bestimmung des Widerstandes gegen Hydroabrasionsverschleiß – Teil 1: Hydroabrasionsprüfgerät“ beschreibt im Wesentlichen den Aufbau der Prüfapparatur und die Ausführung und die Anforderungen an die Prüfkörper
- Teil 2 trägt den Titel „Emails und Emailierungen – Bestimmung des Widerstandes gegen Hydroabrasionsverschleiß – Teil 2: Lokaler Schichtdickenverlust“. Hierin wird der Versuchsablauf und die Auswertung sowie die Dokumentation der Versuchsergebnisse detailliert beschrieben.

Gegenüber den in /1/ und /2/ getroffenen Festlegungen wurden nur wenige Randbedingungen geändert bzw. die Vorgehensweise vereinfacht und Ergänzungen hinzugefügt:

- Der Versuchsbehälter kann nun auch aus Baustahl bestehen
- Kleinere Änderungen an der Art der Probenbefestigung
- Die Versuchsdauer wurde auf 300 Minuten festgelegt
- Der Emailabtrag wird nunmehr einmalig nach Versuchsende ermittelt
- Der Emailabtrag wird nunmehr an nur einer repräsentativen Stelle an der angeströmten Seite des Probekörpers ermittelt (im Bereich der Kuppe)
- Statt den Emailabtrag einzelner Probekörper zu betrachten, wird nun der über vier Probekörper gemittelte Emailabtrag als Kennwert abgeleitet
- Eine Definition bezüglich der Ausführung der Dokumentation der Versuchsergebnisse wurde ergänzt
- Ergänzung von Querverweisungen zu anderen, relevanten bzw. mitgeltenden Normen und Richtlinien.

6. Schlussfolgerungen

Hydroabrasion ist neben der chemischen Korrosion eine wesentliche Ursache für das Versagen emaillierter Apparate in der Verfahrenstechnik. Mit dem in /1/ und /2/ vorgestellten Verfahren zur Quantifizierung der Verschleißbeständigkeit emaillierter Oberflächen unter hydroabrasiven Bedingungen wurde erstmals ein Schritt unternommen, die Spezifika dieses Ver-

schleißmechanismus in reproduzierbarer Form zu untersuchen und damit eine quantitative Vergleichbarkeit emaillierter Oberflächen zu ermöglichen.

Mit der Überführung des ursprünglich von THALETEC entwickelten und umgesetzten Verfahrens zur Bestimmung des Hydroabrasionswiderstandes emaillierter Oberflächen in eine DIN-Norm ist es gelungen, dass dieses Verfahren neben den verschiedenen aus der Dünnschleif-emaillierung bekannten Verschleißprüfverfahren, wie dem Taber-Verfahren nach ISO 6370 /6/, dem Reibradverfahren der Fa. Kaldewei/Polyvision und dem „Kreisschüttler“ der Fa. Silit /7/, zukünftig einen festen Platz als Verschleißprüf- und Bewertungskonzept für technische Emailierungen einnehmen wird.

Besonders positiv hervorzuheben ist, dass der Wille und das Interesse aller bedeutenden Hersteller emaillierter Apparate sowie der Anwender emaillierter Apparate vorhanden war und ist, dieses Konzept in eine Norm zu überführen.

Im nächsten Schritt muss nun ein „neutrales“ und herstellerunabhängiges Prüfinstitut gefunden werden, welches Hydroabrasionsprüfungen nach DIN 51165 -1 und -2 anbietet und durchführt. Schließlich ist die Norm in eine internationale Norm zu überführen.

7. Literatur

- /1/ Reinemuth, J.: Modellierung und Minimierung des Hydroabrasivverschleißes beim Rühren in emaillierten Rührbehältern, Teil 1, in: Mitteilungen des Deutschen Email Verbandes 60 (2012) 40-48
- /2/ Reinemuth, J.: Modellierung und Minimierung des Hydroabrasivverschleißes beim Rühren in emaillierten Rührbehältern, Teil 2, in: Mitteilungen des Deutschen Email Verbandes 60 (2012) 50-55
- /3/ Gesellschaft für Tribologie e.V.: Verschleißschutz und Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderungen; Eine Expertenstudie der Gesellschaft für Tribologie e.V. (2021). <https://www.gft-ev.de/wp-content/uploads/GfT-Studie-Verschlei%C3%9Fschutz-und-Nachhaltigkeit.pdf> (Stand 02/2023)
- /4/ Uetz, H.: Abrasion und Erosion, München Wien: Carl Hanser Verlag 1986
- /5/ Schäfer, G.: Abnutzung vorgebeugt, in CAV 10/2010, Konradin Verlag, 46-47
- /6/ ISO 6370:1991: Vitreous and porcelain enamels, Determination of the resistance to abrasion, Part 1: Abrasion testing apparatus
- /7/ Deutscher Email Verband, AK Stahlblech-emaillierung: Protokoll der Sitzung vom 27.9.2011: Ringversuch Abriebbeständigkeit (Kaldewei, Polyvision, Silit, Pemco)