

Andreas Kern, Christian Heet,
Franz Domenic Boos, Błażej Kempinski,
Dennis Maximilian Röllinger

Wear Problems? – Laboratory Testing and Numerical Simulation Support the Selection of the Best Material

In view of the high costs that arise each year due to material wear, which can amount to several percent of GDP, there is now an urgent need for wear protection systems designed to help reduce this financial loss. This requires a detailed knowledge of the areas in which the components or machine parts are being used, as these elements are frequently subjected to superimposed stress from various erosion mechanisms. Wear behaviour depends on the properties of the material in question, including its strength and hardness levels, as well as on the charac-

teristics of the opposing body and ambient medium and on the design and structural constraints. Wear is therefore not a material property but rather a system characteristic. Nevertheless, the behaviour of the individual materials that are used for wear protection has to be known with respect to the types of stress involved. Because of their extreme hardness, e.g., abrasion-resistant materials can fail very quickly under impact stresses of the kind that can arise in hammer mills and in pumps due to cavitation.

Verschleißprobleme? – Mit Laborversuchen und numerischer Simulation zur optimalen Werkstoffauswahl

Aufgrund der hohen Kosten, die jährlich durch Verschleiß entstehen und einige Prozent des Bruttoinlandsprodukts (BIP) betragen können, ist es zwingend notwendig, diese durch geeignete Verschleißschutzsysteme zu minimieren. Hierfür sind genaue Kenntnisse des Einsatzgebiets der jeweiligen Bauteile und Anlagen- oder Maschinenkomponenten erforderlich, da diese häufig überlagerten Beanspruchungen von verschiedenen Abtragsmechanismen unterliegen. Das Verschleißverhalten hängt von den Werkstoffeigenschaften – u.a. Härte und Festigkeit – aber auch von den Eigen-

schaften des Gegenkörpers und dem Umgebungsmedium sowie konstruktiven Randbedingungen ab. Auftretender Verschleiß ist somit keine Werkstoff-, sondern immer eine Systemeigenschaft. Ebenso muss aber auch das Verhalten der einzelnen Werkstoffe, die für den Verschleißschutz eingesetzt werden, gegenüber den Beanspruchungsarten bekannt sein. So können z.B. abrasionsbeständige Werkstoffe bei Auftreten von schlagenden Beanspruchungen wie in Pumpen durch Kavitation oder in Schlagmühlen aufgrund ihrer hohen Härte sehr schnell versagen.

1 Basic principles of wear mechanisms

The DIN 50320 standard, which was withdrawn in 1997 without being replaced, contained the following definition: “Wear is the progressive loss of material from the surface of a solid body due to mechanical causes, i.e. contact with and relative movement to a solid, liquid or gaseous antibody.”

Wear of itself is a system quantity and in order to be able to understand the wear processes it is always necessary to analyse the tribological system that underlies the wear factor (Figure 1). A tribological system comprises a main body and an opposing body, an intermediate (even air) and a surrounding medium. A stress collective acts on this system and alters its surfaces by way of the material abrasion or deformation caused by the stresses that are activated by the relative movement between the elements.

1 Grundlagen der Verschleißmechanismen

Die 1997 ersatzlos zurückgezogene DIN 50320 definiert folgendermaßen: „Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.“

Verschleiß selbst ist eine Systemgröße und für das Verständnis von Verschleißvorgängen muss immer das dem Verschleiß zugrunde liegende Tribosystem (Bild 1) analysiert werden. Ein Tribosystem besteht aus Grund- und Gegenkörper, einem Zwischenstoff (auch Luft) und dem Umgebungsmedium. Auf dieses System wirkt ein Beanspruchungskollektiv und verändert aufgrund der wirkenden Belastungen bei Relativbewegung zueinander die Oberflächen durch Materialabtrag oder Verformung.

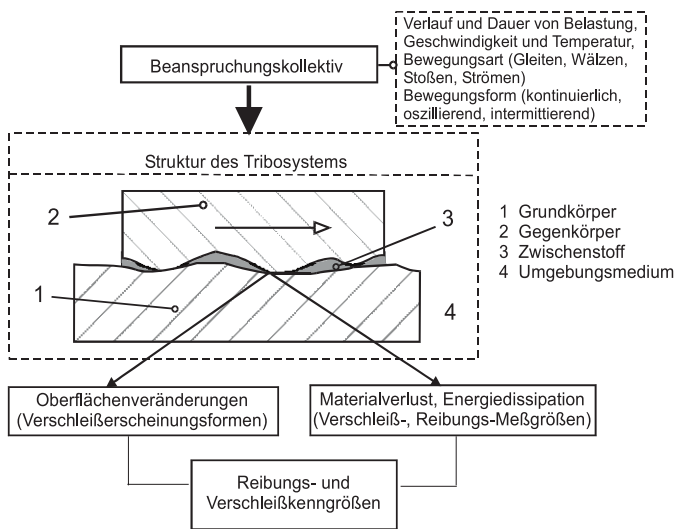


Fig. 1. Composition of a tribosystem (1).
Bild 1. Aufbau eines Tribosystems (1).

Because of the many different types of loading that are possible there is, e.g., no material that can provide general protection against wear. The four possible and mutually overlying wear mechanisms (abrasion, surface breakup, adhesion and tribocorrosion) call for often contradictory material requirements. These four wear mechanisms will be briefly outlined below:

Abrasion occurs when the roughness peaks of hard bodies, hard abrasive materials or even solidified and separated wear particles penetrate softer bodies under load and then slide over their surfaces (Figure 2). In the case of ductile materials the processes involved are known as microdeformation and microchipping. When hard phases are present in the ductile matrix microfracture may also occur. Microdeformation processes can, through multiple repetition, result in material fatigue and consequently in material abrasion. The amount of wear induced by pure abrasion is very much dependent on the hardness ratio between the component material and the abrasive material. The high state/low state characteristic that applies here is similar to the notch

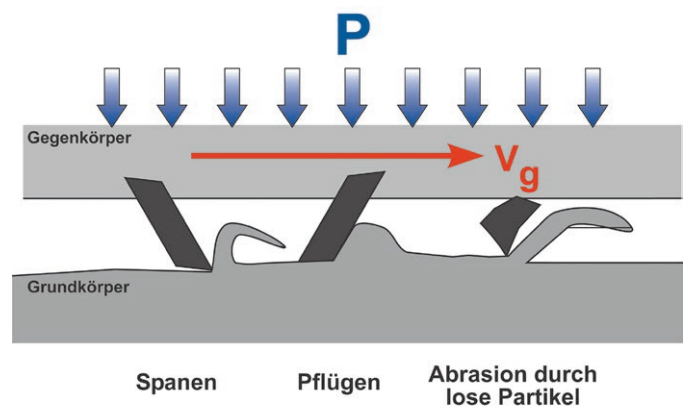


Fig. 2. Schematic representation of the abrasion process (2).
Bild 2. Schematische Darstellung von Abrasion (2).

Aufgrund der vielen möglichen Belastungsarten gibt es beispielsweise keinen Werkstoff, der generell gegen Verschleiß schützt. Die vier möglichen, auch sich gegenseitig überlagernden Verschleißmechanismen (Abrasion, Oberflächenzerrüttung, Adhäsion und Tribokorrosion) erfordern sich teils widersprechende Werkstoffanforderungen. Im weiteren Verlauf werden die vier Verschleißmechanismen kurz charakterisiert:

Von Abrasion wird gesprochen, wenn Rauheitsspitzen harter Festkörper, harte Abrasivstoffe oder auch abgetrennte verfestigte Verschleißpartikel unter Last in weichere Festkörper eindringen und über deren Oberflächen gleiten (Bild 2). Hierbei finden bei duktilen Werkstoffen Mikroverformungs- und Mikrozerspanungsprozesse statt. Bei Vorhandensein von harten Phasen in der duktilen Matrix kann dazu auch noch ein Mikrobrechen kommen. Mikroverformungsprozesse führen durch mehrfache Wiederholung zu einer Werkstoffermüdung und somit zum Materialabtrag. Die Höhe des Verschleißes ist bei reiner Abrasion stark abhängig vom Härteverhältnis von Bauteilwerkstoff zu Abrasivstoff. Hierbei gilt eine Hoch-/Tiefklage-Charakteristik analog zur Kerbschlagarbeit (Bild 3). Somit gilt für Abrasion, dass ein guter Verschleißschutz mit einem möglichst harten Bauteil gewährleistet wird. Der Verlauf der Kurve erinnert an das Hoch-/Tiefklageverhalten ferritischer Stähle beim Kerb-

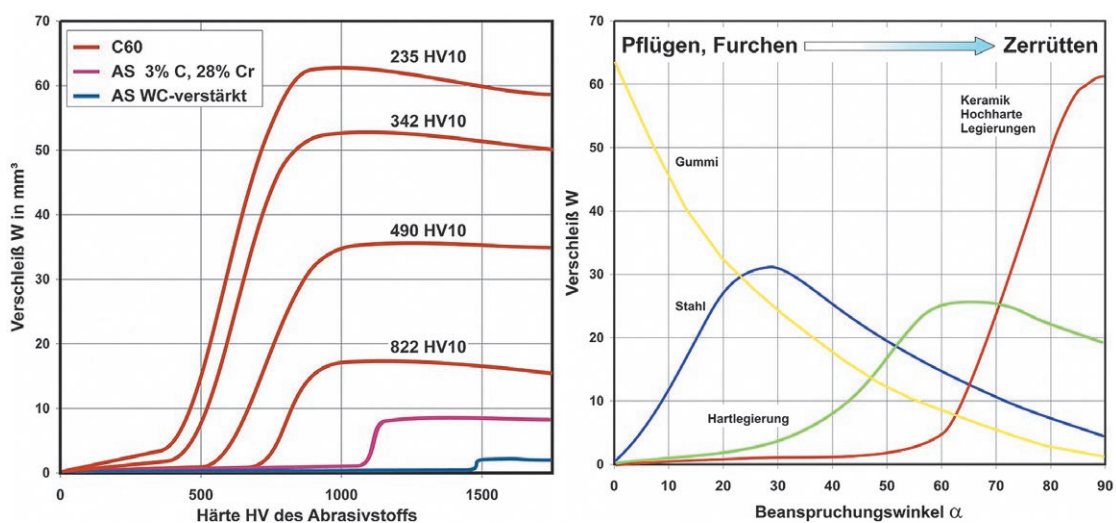


Fig. 3. Interdependencies (hardness (left), angle of impact (right)) for the abrasion and erosion process (3).
Bild 3. Abhängigkeiten (Härte (links), Auftreffwinkel (rechts)) bei Abrasion und Erosion (3).

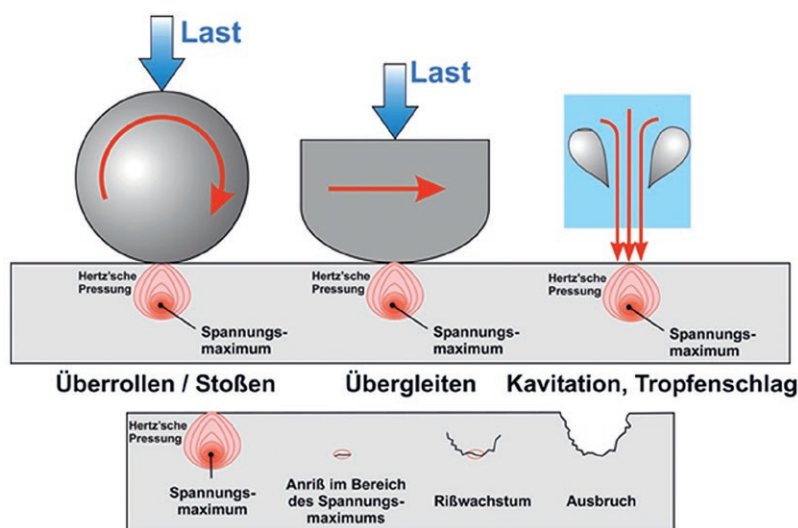


Fig. 4. Schematic depiction of surface breakup processes (2).

Bild 4. Schematische Darstellung von Oberflächenzerrüttungsvorgängen (2).

impact toughness (Figure 3). This means that when it comes to abrasion good wear protection is ensured when the component is as hard as possible. The path of the curve recalls the high state/low state behaviour of ferritic steel in the Charpy V-notch test and is designated as such in the case of wear. This characteristic will be dealt with in some detail below when examining the role of numerical simulation.

Another important influence factor for abrasion is the force acting on the component, as this determines the penetration depth of abrasive particles/microstructure phases etc. and hence the volume of material being removed from the surface of the component.

Surface breakup occurs as a result of repeated cyclical loading on the surfaces of solid bodies. Multiple plastic deformation causes the energy accumulation capacity of the affected material to disappear, leading to cracks that propagate and ultimately result in fractures (Figure 4). Here it has to be borne in mind that the maximum loading, according to the Hertzian stress principle, does not occur on the surface of the component but rather below it. It is at this point that the component's strength can be locally overcome, leading to a crack that will grow under repeated stress. Macroscopically elastic deformation can also cause microscale displacements to occur, with the result that here too the energy accumulation capacity drops and cavities and breakouts can appear. Surface breakup occurs as a result of rolling, sliding and impact processes. The targeted application of residual compressive stress to the material surface protects against surface breakup, as does a homogenous microstructure and hardness combined with a high ductility.

Adhesion occurs when there is metal to metal contact. In the case of normal load and shear load any sliding movement will cause elastic-plastic deformation at a microscale level and this will lead to the spalling of the existing adsorption and reaction layers. The now bright metallic contact areas will then undergo permanent fusion as a result of atomic bonding. These bonding bridges are referred-to as adhesion. If the sliding action continues the bonding bridges will break up and if they are strong enough there may be a transfer of material (Figure 5). Cubic, face-centred

schlagbiegeversuch und wird auch beim Verschleiß so bezeichnet. Auf diese Charakteristik wird nachfolgend für die numerische Simulation vertieft eingegangen.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Abrasion ist die auf das Bauteil wirkende Kraft, da durch diese die Eindringtiefe von abrasiv wirkenden Partikeln/Gefügephasen etc. bestimmt wird und somit das Volumen des abgetragenen Werkstoffs aus der Bauteiloberfläche.

Oberflächenzerrüttung tritt als Folge wiederholter zyklischer Beanspruchung der Festkörperoberflächen auf. Durch mehrfache plastische Deformation schwindet das Energieakkumulationsvermögen des betroffenen Werkstoffs und es entstehen Anrisse, die sich ausbreiten und schließlich zu Ausbrüchen führen (Bild 4). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das Spannungsmaximum entsprechend der Hertz'schen Pressung nicht an der Bauteiloberfläche auftritt, sondern unterhalb. Hier kann es zum lokalen Überschreiten der Bauteilfestigkeit kommen und somit zum Anriß, der durch

wiederholte Belastung wächst. Aber auch durch makroskopisch elastische Verformungen können im Mikrobereich Versetzungen stattfinden, die dazu führen, dass auch in diesem Fall das Energieakkumulationsvermögen sinkt und es auch hier zu Anrissen und Ausbrüchen kommen kann. Oberflächenzerrüttung tritt bei Wälz-, Gleit- und Prallvorgängen auf. Das gezielte Einbringen von Druckeigenstress in die Oberfläche wirkt schützend gegen Oberflächenzerrüttung, ebenso ein homogenes Gefüge und Härte bei gleichzeitig hoher Zähigkeit.

Adhäsion tritt bei Metall-Metall-Kontakten auf. Durch Normal- und Schubbeanspruchungen kommt es bei der Gleitbewegung zu elastisch-plastischen Verformungen im Mikrobereich, was zu einem Abplatzen der vorhandenen Adsorptions- und Reaktionsschichten führt. Die jetzt metallisch blanken Kontaktbereiche gehen durch atomare Bindungen eine feste Verbindung ein. Diese Haftbrücken sind die Adhäsion. Wird die Gleitbewegung weitergeführt, kommt es zu einem Aufbrechen dieser Haftbrücken, bzw. bei ausreichender Festigkeit zu einem Materialübertrag (Bild 5). Besonders anfällig für Adhäsion sind kubisch flächenzentrierte Gefüge. Vermindert oder vermieden werden kann Adhäsion durch ausreichende Schmierung oder eine Werkstoffpaarung unterschiedlicher Gitterstruktur.

Bei der Tribokorrosion – auch Tribooxidation oder tribochemische Reaktion – wird die Oberfläche des Festkörpers durch

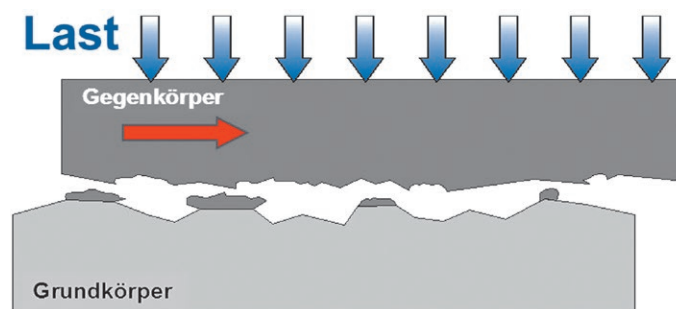


Fig. 5. Adhesion (2). // Bild 5. Adhäsion (2).

microstructures are especially liable to adhesion. This adhesion can be reduced or prevented by means of proper lubrication or by using a material combination with different lattice structures.

In the case of tribocorrosion – and also with tribo-oxidation and tribochemical reaction – the surface of the solid body is chemically activated by micromovements and will then react with the surrounding medium. This reaction layer can exhibit quite different properties from those of the base material and may not bond with it in any way. Further movement will cause this layer to be removed and a new reaction layer will be formed (Figure 6). The superimposition of corrosion and wear can cause the total amount of material removed to be higher than might be expected due to the additional impact of the process speeds. Frictional corrosion is a typical example of tribocorrosion. The latter can be prevented by adequate lubrication and by using non-metallic materials (ceramics and plastics).

The various wear mechanisms and their forms of appearance are listed in Table 1.

Wear mechanism Verschleißmechanismus	Form of appearance Verschleißerscheinungsform
Adhesion / Adhäsion	scuffing, pitting, peaks, flaking, material transfer Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen, Materialübertrag
Abrasion / Abrasion	scratches, striae, recesses, ripples Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen
Surface breakup Oberflächenzerrüttung	cracks, dimples Risse, Grübchen
Tribocorrosion/tribochemical reactions Tribokorrosion/Tribochemische Reaktionen	reaction products (layers, particles) Reaktionsprodukte (Schichten, Partikel)

Table 1. Wear mechanisms and forms of appearance.
Tabelle 1. Verschleißmechanismus und Verschleißerscheinungsformen.

2 Test methods

The resistance that the materials can offer to the individual wear stresses can be analysed using different wear tests. The most accurate information on service life expectancy can be obtained by using field tests. However, the actual loads involved and the machine regime make this kind of test a very protracted and cost-intensive process. The model test, on the other hand, is both quick and cost-effective. Because it is highly simplified, however, it does not provide information on the working life of the installation or of an individual component, but merely serves as a screening test aimed at preselecting materials to perform a certain role. Simple modifications to the model test can help improve the preselection process by bringing the testing process closer to the actual tribosystem. Changes of this kind are discussed below using the standardised friction wheel test and the non-standardised wear cup test as examples. The impact of the changes on the test results is also demonstrated.

2.1 Friction wheel test

The friction wheel test (international standard ASTM G65-16) (4) is one of the best-known model tests for determining the abra-

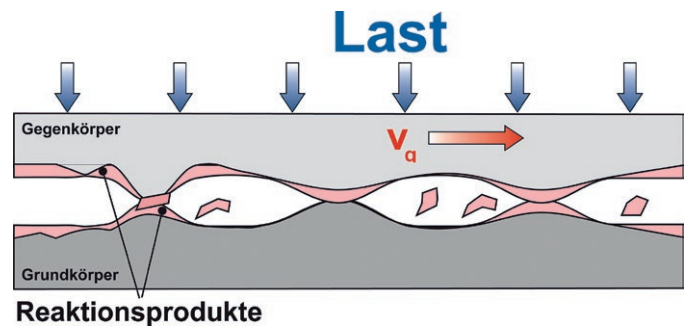


Fig. 6. Tribocorrosion (2). // Bild 6. Tribokorrosion (2).

Mikrobewegungen chemisch aktiviert und reagiert mit dem Umgebungsmedium. Diese Reaktionsschicht kann gänzlich andere Eigenschaften als der Grundwerkstoff und keine Bindung an diesen aufweisen. Durch weitere Bewegungen wird diese Schicht abgetragen und eine neue Reaktionsschicht gebildet (Bild 6). Durch die Überlagerung von Korrosion und Verschleiß kann der Gesamtabtrag höher sein, als es durch die Addition der Prozessgeschwindigkeiten zu erwarten wäre. Ein typisches Beispiel für Tribokorrosion ist der Passungsrost. Tribokorrosion kann durch ausreichende Schmierung oder den Einsatz nichtmetallischer Werkstoffe (Keramiken oder Kunststoffe) vermieden werden.

In Tabelle 1 sind die verschiedenen Verschleißmechanismen und die jeweiligen Verschleißerscheinungsformen aufgelistet.

2 Prüfverfahren

Der Widerstand, den Werkstoffe den einzelnen Verschleißbeanspruchungen entgegenbringen, kann durch verschiedene Verschleißversuche analysiert werden. Die präzisen Aussagen zur Lebensdauer erlaubt der Betriebsversuch. Dieser ist aber aufgrund der realen Beanspruchungen und der Anlage sehr kostenintensiv und langwierig. Der Modellversuch hingegen ist zeitlich schnell und kostengünstig. Er erlaubt aber aufgrund der starken Vereinfachung keine Aussage über die Lebensdauer einer Anlage oder eines Bauteils, sondern dient lediglich als Screeningversuch zur Vorauswahl von Werkstoffen für einen bestimmten Anwendungszweck. Einfache Veränderungen in Modellversuchen sollen helfen, eine bessere Vorauswahl zu treffen, indem diese näher an das reale Tribosystem heranrücken. Am Beispiel des genormten Reibradtests und des nicht genormten Verschleißstopftests werden im Folgenden solche Veränderungen diskutiert und ihre Auswirkungen auf das Versuchsergebnis gezeigt.

2.1 Reibradtest

Der Reibradversuch nach ASTM G65-16 (4) ist einer der bekanntesten Modellversuche zur Bestimmung des abrasiven Widerstands von Werkstoffen. Hierbei wird eine rechteckige Probe gegen ein gummiertes Reibrad mit einer definierten Kraft gedrückt. Ein Quarzsand mit festgelegter Körnung wird in diesen Kontakt gebracht, durch die Rotation des Reibrads über die Oberfläche der Probe geführt und verursacht hierbei den Materialabtrag durch Abrasion (Bild 7). Die wichtigsten Versuchsparameter sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die verschiedenen Methoden sind für unterschiedliche Oberflächen und Beanspruchungsbedingungen gedacht, sodass Be-

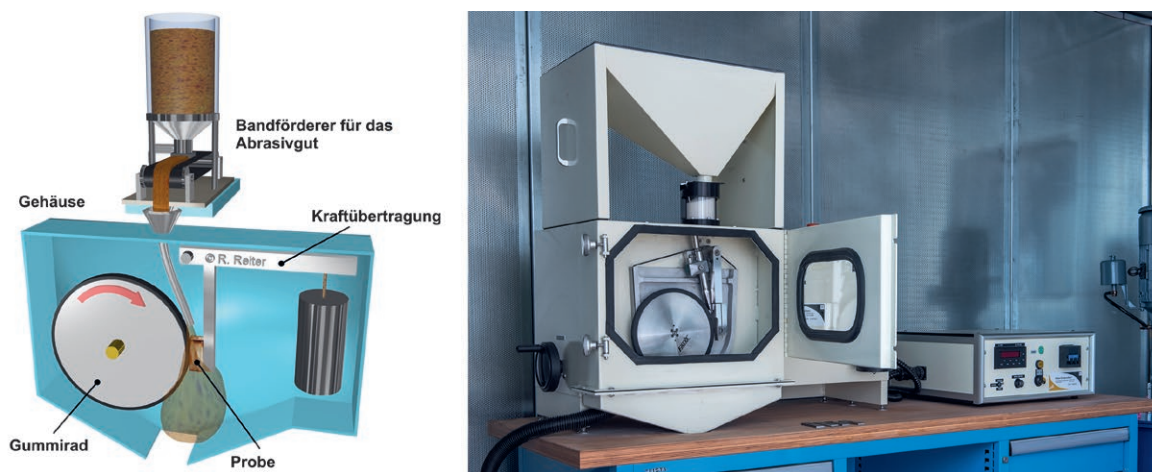


Fig. 7. Left: Test arrangement acc. to ASTM G65-16 (5). Right: Test rig.
Bild 7. Links: Versuchsaufbau nach ASTM G65-16 (5), rechts: eingesetzter Prüfstand.

sive resistance of materials. Here a rectangular sample is pressed against a rubber wheel with a defined force. Quartz sand of specified particle size is introduced into the contact zone and carried over the surface of the sample by the rotation of the friction wheel, thereby causing material to be removed by abrasion (Fig. 7). The main test parameters are presented in Table 2.

Method Methode	Wear path in m (rotations) Verschleißweg in m (Umdrehungen)	Load in N Last in N	Mass flow in g/min Massenstrom in g/min	Friction wheel Reibrad
A	4309 (6000)	130	300 – 400	Neoprene (after 2016) or chlorobutyl, hardness 60±2 Shore A
B	1436 (2000)	130		
C	71,8 (100)	130		
D	4309 (6000)	45		
E	718 (1000)	130		

Table 2. Parameters of the friction wheel test acc. to ASTM G65-16.
Tabelle 2. Parameter des Reibradversuchs nach ASTM G65-16.

The various methods are drawn up for different surfaces and loading conditions so that coatings such as deposit welding, CVD/PVD coatings and solid materials can all be qualified.

The effect produced by different types of quartz sand is also investigated. A total of three different types of sand are used, namely the Ottawa sand recommended in the standard, which has a grain size as defined in FEPA F60 (212 to 300 µm), and two

schichtungen wie Auftragschweißungen, CVD/PVD-Schichten oder Vollmaterialien qualifiziert werden können.

Untersucht wird der Einfluss verschiedener Quarzsande. Insgesamt werden drei verschiedene Quarzsande eingesetzt. Diese sind einmal der in der Norm empfohlene Ottawasand mit einer Korngröße entsprechend der FEPA F60 (212 bis 300 µm) und zwei Gießereisande aus Deutschland (Abbauorte: Nordrhein-Westfalen (NRW) und Sachsen-Anhalt (SA)). Die Alternativsande haben einen breiteren Korngrößenbereich von 180 bis 355 µm, da eine Siebung nach FEPA für Quarzsande in Europa nicht stattfindet. In Bild 8 sind REM-Aufnahmen von zwei Quarzsanden dargestellt. Beide Sande sind, wie in der Norm vorgegeben, kantengerundet. Der Gießereisand aus Nordrhein-Westfalen zeigt an der Oberfläche deutlich mehr Schädigungen als der amerikanische Ottawasand. In Tabelle 3 ist die chemische Zusammensetzung der Sande aufgeführt. Alle Sande weisen eine Härte von 7 auf der Mohs-Härteskala auf.

Die untersuchten Werkstoffe sind acht niedriglegierte Stähle unterschiedlicher Wärmebehandlungszustände. Sofern nicht anders bezeichnet werden sie mit Ottawasand getestet.

Die Proben werden vor und nach Versuch gereinigt, entmagnetisiert und auf einer Analysenwaage gewogen und der Masseverlust bestimmt. Eine Bestimmung des Volumenverlusts erübrigt sich, da die untersuchten Werkstoffe dieselbe Dichte aufweisen. Alle Versuche werden mit Methode A (4.309 m Verschleißweg, 130 N Anpresskraft, Neoprenreibrad) durchgeführt.

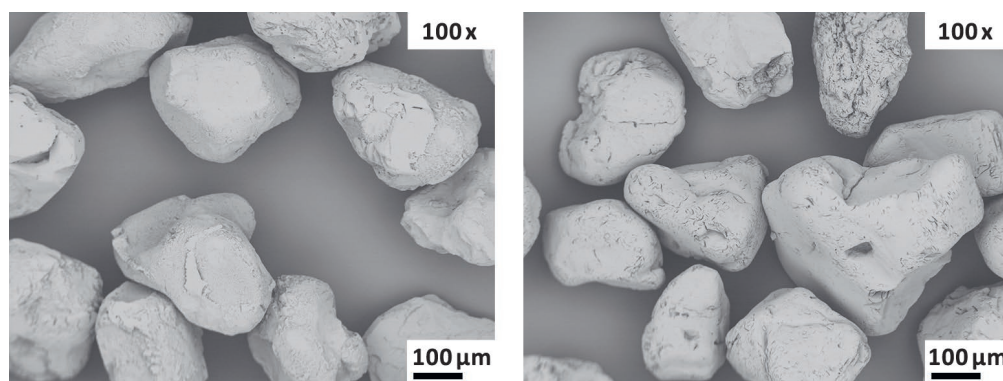


Fig. 8. Quartz sands used for the test, left: Ottawa sand, right: foundry sand from NRW.
Bild 8. Eingesetzte Quarzsande, links: Ottawasand, rechts: Gießereisand aus NRW.

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Loss due to heating Glühverlust
Ottawa	99,7	0,02	0,06	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
NRW	99,4	0,03	0,2	./.	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,2
SA	99,7	<0,08	<0,1	./.	<0,02	./.	<0,02	<0,02	./.

Table 3. Chemical composition of the quartz sands, % by mass (manufacturer's specifications).

Tabelle 3. Chemische Zusammensetzung der Quarzsande, Mass.-% (Herstellerangaben).

foundry sands from Germany (sourced from North Rhine-Westphalia (NRW) and Saxony-Anhalt (SA)). These alternative sands have a wider particle-size range of 180 to 355 µm as in Europe the screening of quartz sands is not carried out in accordance with the FEPA system. Figure 8 shows SEM images of two different quartz sands. Both are edge-rounded, as specified in the standard. The foundry sand from North Rhine-Westphalia clearly exhibits much more surface damage than the Ottawa sand from America. The chemical composition of the sands is presented in Table 3. All three have a hardness of 7 on the Mohs hardness scale.

The materials being tested comprise eight low-alloy steels that have gone through different levels of tempering. Ottawa sand is used as the testing medium, unless otherwise stated.

The samples are cleaned before and after testing. They are then de-magnetised and weighed on an analytical balance and the loss of mass is measured. No measurement of loss in volume is required as the materials in question all have the same density. All the tests were conducted using method A (4,309 m wear path, 130 N contact force, neoprene friction wheel).

The results obtained with the different abrasives are presented in Figure 9. The differing behaviour of the steels in response to the different types of sand is clearly evident. It was not possible to differentiate between the different steels when using the foundry sand from Saxony-Anhalt. In the context of the measurement uncertainty arising during the wear test all the steels were found to be of the same level. The foundry sand from North Rhine-Westphalia showed a sharp decrease up to a hardness of 300 HB and then only slightly fell away after this mark. The Ottawa sand exhibited a moderate drop up to a hardness of 300 HB and then fell away significantly after this. This means that up to a hardness value of 300 HB the sand not listed in the standard enables a better differentiation of the materials, and hence a better pre-selection of materials for a specific application, when a less aggressive abrasive is used.

Two of the sands (Ottawa and NRW) were further subjected to an impact test in order to clarify the significant differences in the results. The sand from Saxony-Anhalt did not require further examination as this had not produced any differentiation in the materials. In this case the sand was screened after being subjected to five, ten and 15 hammer blows and in this way its fracture behaviour was determined. The grain size curves are shown in Figure 10. From this it is clear that the sand from North Rhine-Westphalia breaks down more readily. This can be attributed to the larger number of defects (Figure 2), as the cracks and flaws in the grains mean that less force is required for comminution (6). Because of the greater fragmentation of the grains in the wear contact zone less energy is needed to cause damage to the surface of the sample. This grain comminution process reaches its

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Abrasivgüter sind in Bild 9 dargestellt. Deutlich zu sehen ist das unterschiedliche Verhalten der Stähle bei Einsatz der unterschiedlichen Sande. Der Gießereisand aus Sachsen-Anhalt erlaubte keine Differenzierung der verschiedenen Stähle. Im Rahmen der bei der Verschleißprüfung auftretenden Messungenauigkeit liegen alle Stähle auf einem Niveau. Der Gießereisand aus Nordrhein-Westfalen zeigt bis zu einer Härte von 300 HB einen starken Abfall, um danach nur noch leicht abzufallen. Der Ottawasand zeigt bis zu einer Härte von 300 HB einen moderaten Abfall, um danach stark abzufallen. D.h., dass bis zu einer Härte von 300 HB der nicht in der Norm aufgeführte Sand eine bessere Differenzierung der Werkstoffe erlaubt und somit eine bessere Vorauswahl von Werkstoffen für den Anwendungsfall, wenn ein weniger verschleißendes Abrasivgut zum Einsatz kommt.

Zwei Sande (Ottawa und NRW) werden zur Klärung der stark unterschiedlichen Ergebnisse noch einer Schlagprüfung unterzogen. Eine Überprüfung des Sands aus Sachsen-Anhalt erübrigt sich, da mit diesem keine Differenzierung der Werkstoffe möglich war. Hierbei wird der Sand nach jeweils fünf, zehn und 15 definierten Schlägen mit einem Hammer einer Siebung unterzogen und somit das Bruchverhalten bestimmt. Die Körnungslinien sind in Bild 10 dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass der Sand aus Nordrhein-Westfalen stärker bricht. Dies ist in der höheren Anzahl an Defekten begründet (Bild 2), da durch die Fehler und Risse in den Körnern weniger Kraft zur Zerkleinerung

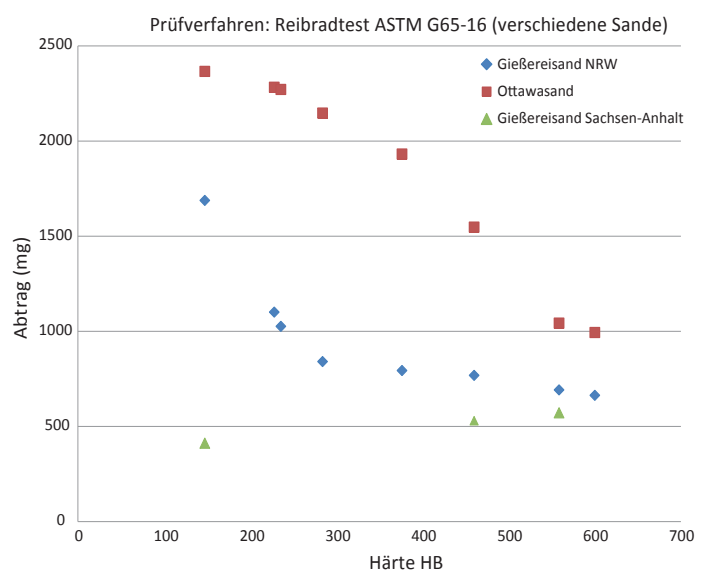


Fig. 9. Influence of the abrasive material on the wear factor.
Bild 9. Einfluss des Abrasivguts auf den Verschleiß.

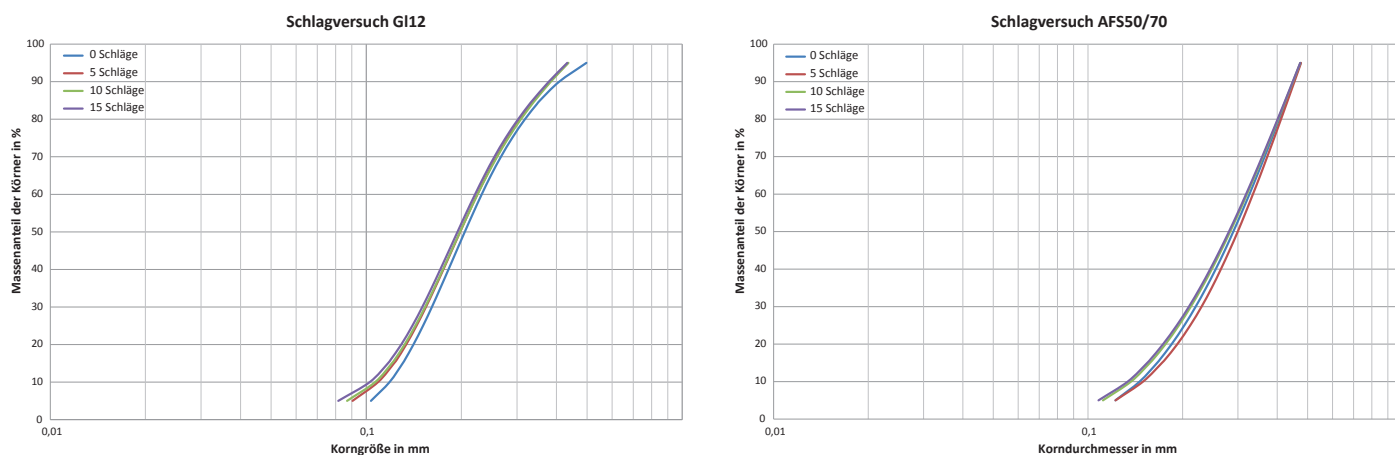


Fig. 10. Screening curves after zero, five, ten and 15 hammer blows, left: foundry sand from NRW, right: Ottawa sand.
Bild 10. Sieblinien nach null, fünf, zehn und 15 Hammerschlägen, links: Gießereisand NRW, rechts: Ottawasand.

maximum at a hardness of up to 300 HB and then produces a fairly uniform degree of degradation thereafter. The amount of wear also begins to approach that of the Ottawa sand as the hardness of the material increases.

In summary it can be seen that by altering some of the individual parameters in the wear tests acc. to ASTM G65-16 significant changes can be obtained in the results. A quartz sand, for example, that is not mentioned in the standard provides a better differentiation for the steel samples in the hardness range to 300 HB than the sand that is recommended and listed in the standard. The use of a third quartz sand also shows, however, that this can already be pre-damaged to such an extent that the investigations aimed at achieving a differentiation do not provide any results. A prior analysis that goes beyond particle size and chemical composition is therefore needed when attempting to select a suitable replacement sand.

2.2 Wear tests using the wear cup method at thyssenkrupp Steel Europe

The wear cup test is a non-standardised testing method with a broad spectrum of adjustable parameters (for a detailed description see (7)). It involves rotating a sample inside a cup filled with an abrasive material (wet or dry) (Figure 11). The rotational movement is produced by rotating the sample, though in some versions it is the cup that performs this movement. A whole range of sample shapes can be used, from simple cubic samples right through to actual components (after consultation). Four samples can be investigated per test.

The test can be varied as a function of the type of abrasive, the relative speed, the angle of impact and the test duration. The configurable effective wear mechanisms consist of surface breakdown and abrasion, both of which can be superimposed by a corrosive attack. Because this procedure is more in keeping with the actual stress conditions the test is able to make a valid assessment of the relative operating life of the test specimen. Where, e.g., the friction wheel test acc. to ASTM G65 is only able to categorise the materials, the wear cup test is capable of assessing how much better a particular material behaves under certain types of loading. Because of its more application-oriented and time-intensive

benötigt wird (6). Durch die stärkere Zerkleinerung des Korns im Verschleißkontakt kann weniger Energie zur Schädigung der Probenoberfläche eingesetzt werden. Diese Kornzerkleinerung findet bis zu einer Härte von 300 HB ihr Maximum, um danach einen gleichbleibenden Abtrag zu erzeugen. Auch die Verschleißhöhe nähert sich mit zunehmender Werkstoffhärte dem Wert des Ottawasands an.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch Änderung einzelner Parameter bei den Verschleißuntersuchungen nach ASTM G65-16 signifikante Änderungen in den Verschleißergebnissen erzielt werden können. So lässt ein Quarzsand, der in der Norm keine Erwähnung findet, im Härtebereich bis 300 HB eine bessere Differenzierung bei Stählen zu als bei Einsatz des in der Norm empfohlenen Sands. Der Einsatz eines dritten Quarzsands zeigte aber auch, dass dieser bereits so vorgeschädigt sein kann, dass Untersuchungen zur Differenzierung kein Ergebnis liefern. Eine vorherige Analyse, die über die Korngröße und chemische Zusammensetzung hinausgeht, ist also notwendig, wenn es um die Auswahl eines geeigneten Ersatzsands geht.

2.2 Verschleißuntersuchungen mit dem Verschleißtopfverfahren bei thyssenkrupp Steel Europe

Der Verschleißtopfstest ist ein nicht genormter Versuch mit einem breiten Spektrum an einstellbaren Parametern (ausführlich beschrieben in (7)). Hierbei rotiert eine Probe in einem mit dem Abrasivgut (trocken oder nass) gefüllten Topf (Bild 11). Die Rotationsbewegung wird durch Rotation der Proben erzeugt, es gibt aber auch Bauformen, bei denen der Topf die Rotationsbewegung ausführt. Als Proben kommen verschiedenste Probenformen in Frage. Diese reichen von einfachen Probenkörpern (kubisch) bis zu realen Bauteilen (nach Absprache). Je Versuch können vier Proben untersucht werden.

Der Versuch kann hinsichtlich Abrasivgut, Relativgeschwindigkeit, Auftreffwinkel und Versuchsdauer variiert werden. Die einstellbaren wirksamen Verschleißmechanismen sind Oberflächenzerrüttung und Abrasion, welche noch durch einen korrosiven Angriff überlagert werden können. Aufgrund der beanspruchungsgerechteren Versuchsdurchführung erlaubt dieser

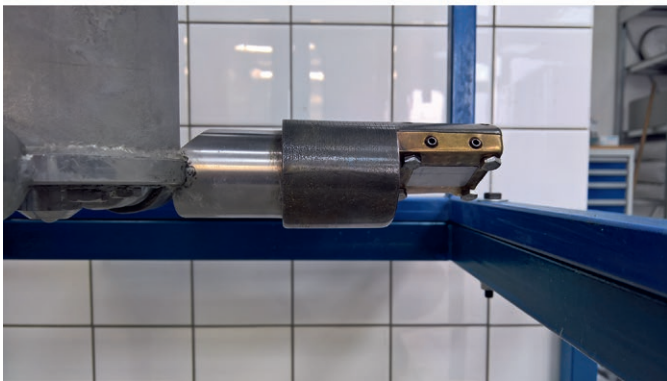


Fig. 11. Test rig operated by thyssenkrupp Steel Europe showing wear cup (left), rotor with test piece mounting (middle) and angle-adjustable sample holder (right). // Bild 11. Bei thyssenkrupp Steel Europe betriebener Verschleißtopf (links), Rotor mit Probenaufnahme (Mitte) und winkelverstellbarem Probenhalter (rechts).

nature this test is usually carried out after a preliminary screening process using, for example, a friction wheel test.

The test rig operated by thyssenkrupp Steel Europe (Figure 11) is capable of a peripheral speed of 0.5 to 5 m/s. The test specimens can be set at an impact angle of 0 to 90° in 15° intervals. The specimen holders for cubic samples are designed in such a way that the test pieces are arranged flush so that only the surface to be tested is impacted and there are no edge effects present that might affect the result.

The samples are weighed on a balance before and after the test (resolution 0.1 mg) and the amount of wear is determined from the difference between the two values. Because of the wide range of wear protection materials of all kinds and with widely differing densities the amount of material removal is given in mm³. This information can also be provided in mg when the samples are of equal density.

While tests with homogeneous abrasive material are fairly easy to present in terms of their evaluability, heterogeneous abrasives make much greater demands on the evaluation process. Figure 12 shows how a wear-resistant steel undergoes wear over the course of time. The test was conducted three times (test 1, 2 and 3). Each test was divided into three intervals of 24 h. The abrasive material used was an artificial cement that was replaced after each

Versuch eine Beurteilung hinsichtlich der relativen Lebensdauer. Wo z. B. der zuvor vorgestellten Reibradversuch nach ASTM G65 nur eine Einordnung der Materialien zulässt, kann mit dem Verschleißtopf abgeschätzt werden, wieviel besser ein Material bei den jeweiligen Beanspruchungen ist. Aufgrund der anwendungsnäheren und zeitintensiven Prüfung wird dieser Versuch durchgeführt, nachdem ein Vorabscreening durch z. B. einen Reibradversuch erfolgt ist.

Der bei thyssenkrupp Steel Europe betriebene Prüfstand (Bild 11) ermöglicht eine Umfangsgeschwindigkeit von 0,5 bis 5 m/s. Die Proben können mit einem Auftreffwinkel von 0 bis 90° in 15°-Intervallen eingespannt werden. Die Probenhalter für kubische Proben sind so gestaltet, dass die Proben bündig eingespannt sind, sodass nur die zu testende Fläche beansprucht wird und keine sogenannten Kanteneffekte das Ergebnis beeinflussen.

Die Proben werden vor und nach Versuch mit einer Waage (Auflösung 0,1 mg) gewogen und aus der Differenz der Verschleiß bestimmt. Aufgrund der großen Anzahl unterschiedlichster Verschleißschutzwerkstoffe mit unterschiedlichsten Dichten wird der Werkstoffabtrag in mm³ angegeben. Bei Proben gleicher Dichte ist auch die Angabe in mg zulässig.

Während Versuche mit homogenem Abrasivgut hinsichtlich ihrer Auswertbarkeit eher einfach zu nennen sind, stellen heterogene Abrasivgüter höhere Anforderungen an die Auswertung. Bild 12 zeigt den Verschleiß eines verschleißbeständigen Stahls über die Zeit. Der Versuch wurde dreimal durchgeführt (Versuch 1, 2 und 3). Jeder Versuch war in drei Intervalle von 24 h unterteilt. Als Abrasivgut kam ein künstlicher Zement zum Einsatz, welches nach jedem Intervall erneuert wurde, um der Abnutzung und Zerkleinerung des Abrasivguts während des Versuchs entgegenzuwirken. Das Abrasivgut bestand aus einem heterogenen Kies (Korngröße: 50 µm bis 4 cm, verrundete und scharfkantige Partikel), der auch bei der Betonherstellung zum Einsatz kommt, Flugasche als Zementersatz und Wasser. Anhand der Steigungen der einzelnen Intervalle, ist sehr gut zu erkennen, wie unterschiedlich hoch der Verschleiß bei gleich gemisch-

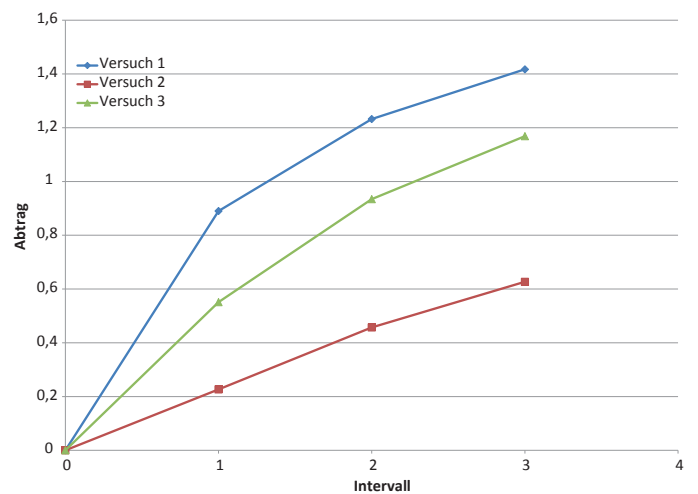


Fig. 12. Wear curve for a wear-resistant steel subjected to a heterogeneous abrasive. // Bild 12. Verschleißkurve eines verschleißbeständigen Stahls bei heterogenem Abrasivstoff.

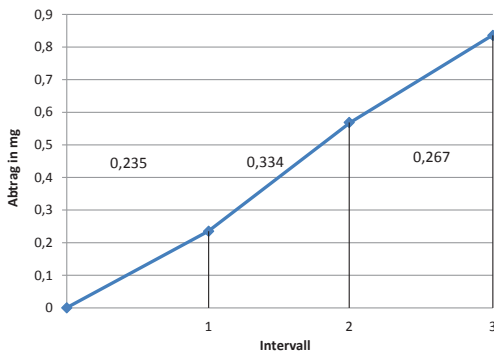


Fig. 13. Wear curve for test with power input recording.
Bild 13. Verschleißkurve bei Versuch mit Leistungsaufzeichnung.

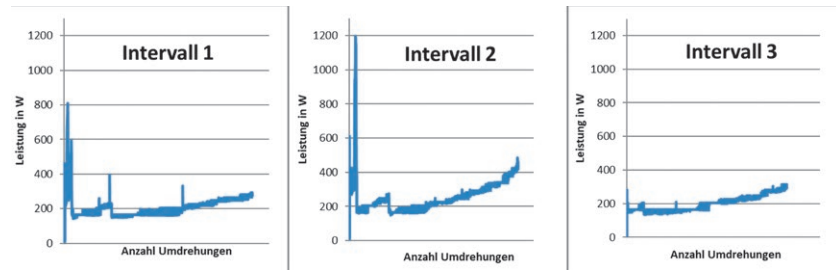


Fig. 14. Curves showing power consumption rates for the individual intervals.
Bild 14. Verlauf der Leistungsaufnahme in den einzelnen Intervallen.

interval in order to counteract the abrasion and comminution it suffered during the test. The material comprised a heterogeneous gravel (particle size: 50 μm to 4 cm, with both rounded and sharp-edged particles) of the kind that is also used in the manufacture of concrete, fly ash as a cement substitute and water. The increases recorded during the individual intervals clearly illustrate how variable the rate of wear can be while using the same mixture of abrasive material. The high variations (0.6 to 1.4 g of abraded material) recorded for just one material meant that it was not possible to draw a comparison with other samples. While the mixing ratio was identical in each case, it was not possible to ensure that the abrasive maintained this same particle size distribution during each interval. This meant that by the end of the test the viscosity of the artificial cement ranged from fairly runny to quite solid. This explains the very different appearance of the wear curves.

Nevertheless, in order to be able to conduct tests with heterogeneous wearing materials, while at the same time ensuring that the process was more application oriented, the wear cup test was extended by including an additional measured variable. For this purpose the power consumed by the drive motor was recorded as the test was under way. The principle here was that the higher the viscosity of the wearing substance, the greater the force needed to conduct the test piece through the mixture at a specified speed. The power input of the motor is proportional to the force required.

Figures 13 and 14 show the amounts of wear recorded (Figure 13) and the corresponding power consumption curves (Figure 14). The power input plots for the individual intervals show a fairly similar pattern. After about 6 h of testing the system was refilled with water in order to ensure that the wearing material remained in a fluid state for the remainder of the test. As the test continued the power consumption rates were seen to increase to varying degrees, this being reflected directly in the amounts of wear being recorded in the individual intervals (see interval 2).

By plotting the power consumption during the wear cup tests it is also possible carry out an evaluation of different materials when using heterogeneous abrasive media. This comparative assessment of the different materials does not only look at the amounts of material abraded but also, in an initial step, draws a comparison between the power consumption figures for each test interval. The second step then compares the material abrasion figures for the different specimens where these correspond with the power consumption plots.

tem Abrasivgut sein kann. Durch die hohen Schwankungen (0,6 bis 1,4 g Materialabtrag) bei bereits einem Werkstoff ist ein Vergleich mit anderen Werkstoffen nicht mehr möglich. Obwohl das Mischungsverhältnis jeweils identisch war, war es beim Abrasivgut nicht möglich, bei jedem Intervall dieselbe Korngrößenverteilung sicherzustellen. Dies hatte zur Folge, dass bei Versuchsende die Viskosität des künstlichen Zements von eher flüssig bis sehr fest reichte. Dies erklärt die sehr unterschiedlichen Verschleißkurven.

Um trotzdem Versuche mit heterogenen Verschleißgütern durchführen zu können, damit diese Versuche anwendungsnäher sind, wurde der Verschleißtopfversuch um eine weitere Messgröße erweitert. Während des Versuchs wird die vom Antriebsmotor aufgenommene Leistung mitgeschrieben. Hierbei gilt, dass je höher die Viskosität des Verschleißguts ist, die Kraft ansteigt, die benötigt wird, um die Probe mit vorgegebener Geschwindigkeit durch das Gemisch zu führen. Die aufgenommene Leistung des Motors ist proportional zur benötigten Kraft.

In den Bildern 13 und 14 sind die Verschleißbeträge (Bild 13) mit den dazugehörigen Leistungsverläufen (Bild 14) dargestellt. Der Verlauf der Leistungsaufnahmen in den einzelnen Intervallen ist sehr ähnlich. Nach jeweils ca. 6 h Versuchszeit wurde Wasser nachgefüllt, um sicherzustellen, dass das Verschleißgut im weiteren Verlauf des Versuchs fließfähig bleibt. Mit zunehmender Versuchsdauer steigt die Leistungsaufnahme unterschiedlich stark an, was sich direkt in den Verschleißbeträgen der einzelnen Intervalle widerspiegelt (s. Intervall 2).

Durch die Aufzeichnung der Leistungsaufnahme ist es möglich, bei Verschleißtopfversuchen mit heterogenem Abrasivgut trotzdem eine Auswertung bei unterschiedlichen Werkstoffen zu erlauben. Hierfür werden im Vergleich unterschiedlicher Werkstoffe nicht einfach die Materialabträge betrachtet, sondern in einem ersten Schritt die Leistungsaufnahmen der einzelnen Intervalle miteinander verglichen. In einem zweiten Schritt können dann die Materialabträge der unterschiedlichen Werkstoffe miteinander verglichen werden, bei denen der Verlauf der Leistungsaufnahmen übereinstimmen.

Bei einem feinkörnigen homogenen Abrasivgut, welches über die Zeit eine konstante Leistungsaufnahme im Versuch aufweist, ist es bei diesem Versuch auch möglich, die Versuchszeit zu reduzieren, da der Verschleiß bei abrasiver Beanspruchung und gleichbleibenden Bedingungen einen linearen Verlauf zeigt.

When using a fine-grained homogeneous abrasive medium that exhibits a constant power consumption rate during the test it is also possible to reduce the duration of the test when using this particular process, as the rate of wear, under abrasive loading and consistent running conditions, shows a linear course.

3 Numerical simulation of wear processes

The numerical simulation of the wear behaviour of wearing materials in interaction with different mating materials is increasingly developing into an important tool for selecting materials to counteract specific wear problems. This time and money-saving method provides an overview of the wear behaviour of different material-to-material combinations and so can produce a comparative assessment of wearing materials in terms of their resistance to wear. In the important case of abrasive wear, when it comes to the interaction between highly abrading substances and the wearing material, the magnitude of the wear stress will essentially depend on the hardness ratio H_p . This primary influencing factor is defined as the quotient of the hardness of the mating material and the hardness of the sheet material (7, 8):

$$H_p = \frac{H_{\text{mating material}}}{H_{\text{material}}}$$

As mentioned earlier, this always results in the development of a high state/low state characteristic with a transition zone lying in between (Figure 15).

When the hardness of the mating material is small in relation to that of the metal the amount of wear suffered will be comparatively small (low state). If the mating material is much harder than the metal plate the wear factor will be much higher (high state). The transition between the two states usually lies in the area where there is parity of hardness. Corresponding threshold values for H_p can be defined for the high and low states. When carrying out a numerical modelling exercise on abrasive wear behaviour the mathematical description of the wear characteristic presented in Figure 15 is of paramount importance. Here the hardness ratio H_p is the primary influencing factor. It is also imperative to know the respective transition points H_{p1} and H_{p2} . According to (9, 10, 11, 12) the threshold value $H_{p1} \approx 0.9$ to 1.3 can be applied for the end of the low state while the limit value $H_{p2} \approx 1.3$ to 1.6 applies for the beginning of the high state. The key indicator for the mathematical modelling of the wear behaviour of wear-resistant structural steels of up to 600 HB hardness is the calculation of the relative wear W_r ,

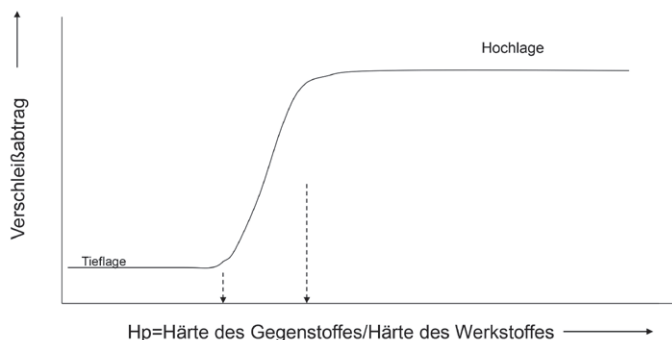


Fig. 15. Schematic characterisation of the wear process (13).
Bild 15. Schematische Charakterisierung des Verschleißes (13).

3 Numerische Simulation von Verschleißvorgängen

Die numerische Simulation des Verschleißverhaltens von Verschleißwerkstoffen bei ihrer Wechselwirkung mit verschiedenen Gegenstoffen stellt zunehmend ein wichtiges Werkzeug zur Unterstützung der Werkstoffauswahl bei Verschleißproblemen dar. Es ermöglicht zeit- und kostensparend einen Überblick über das Verschleißverhalten unterschiedlicher Werkstoff-Gegenstoffkombinationen und kann so auch Verschleißwerkstoffe untereinander in ihrem Verschleißwiderstand bewerten. Betrachtet man den wichtigen Fall des abrasiven Verschleißes, so hängt bei der Wechselwirkung von verschleißend wirkenden Gegenstoffen mit dem Verschleißwerkstoff das Ausmaß der Verschleißbeanspruchung wesentlich vom Härteverhältnis H_p ab. Dieses ist die zentrale Einflussgröße und durch den Quotienten aus der Härte des Gegenstoffs und der Härte des Blechwerkstoffs gegeben (7, 8):

$$H_p = \frac{H_{\text{Gegenstoff}}}{H_{\text{Werkstoff}}}$$

Hierdurch kommt es, wie schon im obigen Abschnitt erwähnt, immer zu einer Ausbildung einer Hoch- und Tieflagencharakteristik zwischen denen ein Übergangsbereich liegt (Bild 15).

Ist die Härte des Gegenstoffs klein im Verhältnis zur Blechhärte, so kommt es zu einem vergleichsweise geringen Verschleiß (Tiefelage). Bei einer deutlich höheren Härte des Gegenstoffs gegenüber dem Blech zeigt sich ein deutlich größerer Verschleiß (Hochlage). Der Übergang ist zumeist im Bereich der Härtegleichheit zu erwarten. Dabei lassen sich für die Hoch- und Tiefelage entsprechende Grenzwerte für H_p angeben. Bei der numerischen Modellierung des abrasiven Verschleißverhaltens steht nun die mathematische Beschreibung der in Bild 15 gezeigten Verschleißcharakteristik im Vordergrund. Hier ist das Härteverhältnis H_p zentrale Einflussgröße. Wichtig ist die Kenntnis der jeweiligen Übergangspunkte H_{p1} und H_{p2} . Nach (9, 10, 11, 12) gilt für das Ende der Tiefelage der Grenzwert $H_{p1} \approx 0,9$ bis 1,3 und für den Beginn der Hochlage $H_{p2} \approx 1,3$ bis 1,6. Zielgröße der mathematischen Modellierung des Verschleißverhaltens für verschleißbeständige Sonderbaustähle mit bis zu 600 HB Härte ist die Berechnung des relativen Verschleißes W_r bezogen auf S355 als Funktion der Härte des Stahls, des Gegenstoffs sowie der Stahlzusammensetzung und ggf. den Umgebungsbedingungen (pH-Wert, Temperatur etc). Die mathematische Modellierung erfolgt dabei abschnittsweise für Hochlage, Tiefelage und Übergangsbereich. Mathematisch anspruchsvoll ist es, entsprechend glatte Übergänge zwischen Hoch- und Tiefelage sowie dem Übergangsbereich zu modellieren. Zielführend erscheint es, zunächst das Hochlagenverhalten, d. h. $H_p > H_{p2}$, zu erfassen. Nach den in den Versuchen ermittelten Zusammenhängen hat sich zur optimalen Beschreibung des Verschleißes in der Hochlage folgender Ansatz als geeignet erwiesen (13):

$$W_H = W_r / W_{r,S235} = A \cdot \exp(\lambda \cdot HB^*)$$

Dabei ist A von der Stahlzusammensetzung durch

$$A = \alpha + \sum \beta_i \cdot (C, Si, Mn, \dots)$$

und HB^* als auf den Bereich + 0,5 normierte Härte des Stahls im Härteintervall 120 bis 600 HB durch

with reference to S355 as a function of the hardness of the steel, the mating material and the steel composition, and where applicable the ambient conditions (pH value, temperature etc.). Here the mathematical modelling is carried out section by section for the high state, low state and transition zone. Modelling fairly smooth transitions between the high state and low state and the transition zone can present quite a challenge in mathematical terms. Here it appears expedient to start off by identifying the high-state behaviour, i.e. $H_p > H_{p2}$. According to the relationships established in the tests the following approach has proved effective as a means for best describing the wear process in the high state (13):

$$W_H = W_r / W_{r,S235} = A \cdot \exp(\lambda \cdot HB^*)$$

Here A, for steel composition, is given by

$$A = \alpha + \sum \beta_i \cdot (C, Si, Mn, \dots)$$

and HB^* , as the hardness of the steel, standardised to +0.5, in the hardness interval 120 to 600, is given by

$$HB^* = \frac{HB - 120}{600 - 120} - 0,5$$

α , β and λ are constants or coefficients and can be determined using multiple regression.

In the examined cases of score grooving and impact wear it was found that as well as the hardness value (C content) the amount of wear abrasion was also significantly affected by chromium (Cr) and niobium (Nb), with the relative wear factor being reduced when Cr and Nb are added. Cr has a comparatively more pronounced effect on score grooving than it does on impact wear. These findings have metallographic credibility, as increasing the Cr also raises the volume proportion of carbides, which has a positive influence on reducing abrasive wear. Nb causes microstructural refinement, thereby increasing the deformation capabilities of wear-resistant structural steel. This results in increased micro ploughing in the case of score grooving and in increased cratering in the case of impact wear, i.e. less material abrasion overall. (13)

In the case of score grooving it can be seen that the positive effect of Cr increases as the pH value declines. Cr should then also exert a very positive influence on abrasive wear resistance by way

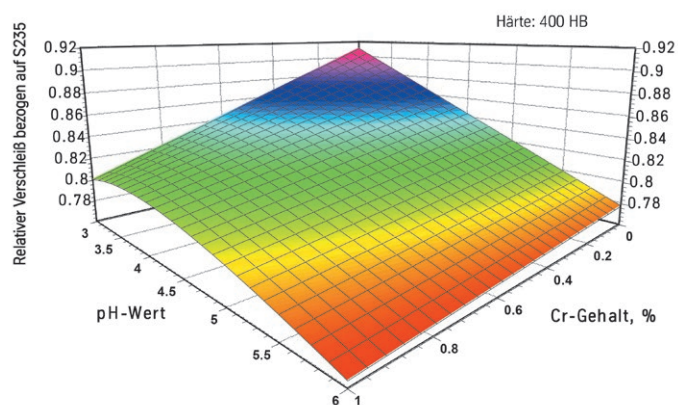


Fig. 16. Effect of pH value and Cr content on relative wear (13).

Bild 16. Einfluss von pH-Wert und Cr-Gehalt auf den relativen Verschleiß (13).

$$HB^* = \frac{HB - 120}{600 - 120} - 0,5$$

gegeben. α , β und λ sind Konstanten bzw. Koeffizienten, diese lassen sich durch multiple Regression ermitteln.

In den untersuchten Fällen des Furchungs- und Prallverschleißes zeigt sich neben der Härte (C-Gehalt) ein signifikanter Einfluss von Chrom (Cr) und Niob (Nb) auf den Verschleißabtrag. Dabei nimmt der relative Verschleiß durch Zugabe von Cr und Nb ab. Im Fall des Furchungsverschleißes ist der Cr-Einfluss vergleichsweise stärker ausgeprägt als bei Prallverschleiß. Diese Effekte sind metallkundlich plausibel, da durch die Cr-Erhöhung u.a. der Volumenanteil an Carbiden erhöht wird, was positiv auf die Verringerung des abrasiven Verschleißes wirkt. Nb bewirkt eine Gefügefinesung, sodass die Verformungsfähigkeit des verschleißbeständigen Sonderbaustahls gesteigert wird. Dies führt zu verstärktem Mikropflügen im Fall des Furchungsverschleißes und zu verstärkter Kraterbildung beim Prallverschleiß, d. h. insgesamt zu weniger Materialabtrag. (13)

Im Fall des Furchungsverschleißes ist zu erkennen, dass die positive Cr-Wirkung mit abnehmendem pH-Wert zunimmt. Cr sollte dann zusätzlich über eine ergänzende korrosionshemmende Wirkung (12) besonders positiv auf den abrasiven Verschleißwiderstand wirken. Dies verdeutlichen die in Bild 16 dargestellten Zusammenhänge aus den Rechnungen für einen Stahl mit rd. 400 HB. Ergänzend zeigt Bild 17 die gute Beschreibbarkeit der Messergebnisse der vorstehenden experimentellen Untersuchungen durch die Vorausberechnungen bei Furchungs- und Prallverschleiß in der Hochlage. Das Bestimmtheitsmaß für die hier gefundenen Zusammenhänge liegt bei rd. 80 %.

In der Tieflage, d. h. $H_p < H_{p1}$ findet naturgemäß praktisch kaum Verschleiß statt. Hier ist es zielführend, für den Verschleiß einen nahezu konstanten Wert anzusetzen. Ausgehend von den experimentellen Ergebnissen wurde für den Fall des Furchungsverschleißes hier der Wert

$$W_T = W_r / W_{r,S235} = 0,05$$

und beim Prallverschleiß der Wert

$$W_T = W_r / W_{r,S235} = 0,08$$

angesetzt.

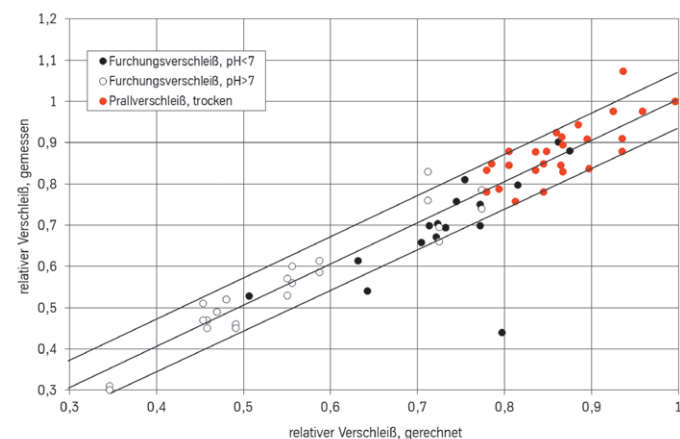


Fig. 17. Comparison of measured and calculated wear (high state) (13).

Bild 17. Vergleich gemessener und gerechneter Verschleiß (Hochlage) (13).

of an additional corrosion-inhibiting impact (12). This is illustrated in Figure 16 by the relationships obtained from calculations for a steel of about 400 HB. Figure 17 complements this by demonstrating that the measurement results from the aforementioned experimental tests can be very clearly defined using the pre-calculations of score grooving and impact wear in the high state. The coefficient of determination for the relationships in this case is around 80%.

In the low state, i.e. $H_p < H_{p1}$, there is naturally practically no wear to speak of. Here it is expedient to ascribe an almost constant value to the wear factor. On the basis of the experimental results the value

$$W_r = W_r / W_{r,S235} = 0,05$$

was applied here for the case of score grooving and the value

$$W_T = W_r / W_{r,S235} = 0,08$$

for impact wear.

In the transition wear zone, i.e. at $H_{p1} < H_p < H_{p2}$, a transition function is defined. The functional approach that can be selected here in mathematical terms is

$$W_U = W_r / W_{r,S235} = C \cdot 1 + \tanh(D \cdot H_p)$$

The magnitude of the constants C and D in this transition equation can be determined from the condition

$$W_H = W_U$$

and from the requirement for a smooth transition at points H_{p1} and H_{p2} , by

$$\frac{dW_H}{dH_p} = \frac{dW_U}{dH_p}$$

Depending on the development of the high state and low state and the position of the transition points H_{p1} and H_{p2} this automatically enables the modelling of a corresponding transition zone with functionally smooth transitions between low state and high state. The equations for high state, transition zone and low state that are obtained in this way can describe in detail the wear behaviour that occurs during the score grooving and impact wear processes.

By combining this model with a previously used computational model for the mechanical properties of wear-resistant structural steels it was possible to develop a general and integral model system (ProWear) for wear-resistant steels of this type (14). This represents a cost-effective and time-saving solution for the practical selection and conception of steels that are subject to abrasive or impact wear stresses. The system as described serves as a technical testing facility both for steel production and for the practical use of high-strength broad strip products that are subject to wear stress. It allows damage curves to be drawn up for the wear behaviour of different steels in a high and low state. As a result of this it is possible to determine the relative wear of various steels in relation to S355 and to estimate the relative changes due to material transition resulting from standing periods. Here the influencing factors are the chemical composition of the steels, the hardness of the opposing material, the angle of attack (only for impact wear) and the characterisation of a damp environment based on the pH value.

Im Bereich des Übergangverschleißes, d. h. bei $H_{p1} < H_p < H_{p2}$ wird eine Übergangsfunktion definiert. Hier kann mathematisch der Funktionsansatz

$$W_U = W_r / W_{r,S235} = C \cdot 1 + \tanh(D \cdot H_p)$$

gewählt werden. Die Größe der Konstanten C und D in dieser Übergangsgleichung lassen sich zum einen aus der Bedingung

$$W_H = W_U$$

und der Forderung nach glatten Übergängen in den Punkten H_{p1} und H_{p2} durch

$$\frac{dW_H}{dH_p} = \frac{dW_U}{dH_p}$$

ermitteln. Je nach Ausbildung der Hoch- und Tieflage und der Position der Übergangspunkte H_{p1} und H_{p2} wird so automatisch ein entsprechender Übergangsbereich mit funktionsmäßig glatten Übergängen zwischen Tief- und Hochlage modelliert. Die so gewonnenen Gleichungen für Hochlage, Übergangsbereich und Tieflage können detailliert das Verschleißverhalten bei Furchungs- und Prallverschleiß beschreiben.

Durch Kopplung dieses Modells mit einem bereits genutzten Rechenmodell für die mechanischen Eigenschaften verschleißbeständiger Sonderbaustähle konnte ein durchgängiges, integratives Modellsystem ProWear für verschleißbeständige Sonderbaustähle erstellt werden (14). Es unterstützt kostengünstig und zeitsparend die praxiserichte Auswahl und Konzeption von Stählen, die einer abrasiven oder prallenden Verschleißbeanspruchung unterzogen werden. Das beschriebene System fungiert als technische Pilotanlage sowohl für die Stahlherstellung als auch für den praktischen Einsatz entsprechender hochfester Bandbleche bei Verschleißbeanspruchung. Es ermöglicht die Ermittlung von Schadenskurven für den Verschleiß unterschiedlicher Stähle in Hoch- und Tieflage. Im Ergebnis können so der relative Verschleiß verschiedener Stähle bezogen auf S355 ermittelt und relative Veränderungen bei Standzeiten durch Werkstoffwechsel abgeschätzt werden. Einflussgrößen sind die chemische Zusammensetzung der Stähle, die Härte des Gegenstands, der Anstrahlwinkel (nur bei Prallverschleiß) und die Charakterisierung einer feuchten Umgebung durch den pH-Wert. Bild 18 zeigt als Beispiel Modellrechnungen zum Furchungsverschleiß. Hier ist das Verschleißverhalten von Blechen unterschiedlicher Härte bei gegebenem Gehalt an Cr und Nb bei Verschleiß durch Eisenerz, Feldspat und Quarz in neutraler Umgebung (pH = 7) dargestellt. Hiernach weist ein Stahl mit rd. 400 HB bei Angriff von Eisenerz mit rd. 400 HB praktisch kaum Verschleiß auf (Tieflage). Bei Angriff von Feldspat oder Quarz hingegen ist ein erhöhter Verschleiß zu erwarten, der etwa 60 % des Verschleißes eines S355 beträgt. Die Modellrechnungen ermöglichen darüber hinaus auch eine Berücksichtigung eines Gemisches mehrerer abrasiver Komponenten mit unterschiedlichen Härten, wie es in der Praxis häufig zu finden ist. (13)

Zur Überprüfung der Brauchbarkeit der Modellierung in der Praxis sind Daten zum Verschleiß der Kippermulden in Kipperfahrzeugen gesammelt, ausgewertet und den Berechnungen gegenübergestellt worden. Bei dem abrasiven Gegenstand han-

Figure 18 shows by way of example model calculations of score grooving in which the wear behaviour of steel plates of different hardness, and with a given content of Cr and Nb, is presented under the wearing action of iron ore, feldspar and quartz in a neutral environment (ph = 7). Here a steel of about 400 HB exhibits practically no wear (low state) when attacked by iron ore of around 400 HB. An abrasive attack by feldspar or quartz, on the other hand, is likely to produce a greater degree of wear, amounting to around 60% of the wear on an S355 steel. The model calculations can also be used for mixtures of several abrasive components of different hardness, as are often encountered in practice. (13)

In order to verify the usability of modelling under practical conditions data on the wear suffered by the bodies of dumper trucks were collected, analysed and compared with the calculations. The abrasive material in question comprised a mixture of different minerals, such as quartz, pyrite and feldspar. This had an average hardness on the Mohs scale of 6 (approx. 759 HV). Of particular interest here was the wear in the 'hot spot', or centre rear section of the tipper body, which is subjected to constant wear as the payload material is loaded and discharged. Figure 19 shows how the wear factor as determined experimentally in field trials compared with the corresponding advance calculations. The rates of wear calculated with ProWear largely correspond to the average abrasion rates suffered in the critical hot-spot zone of the tipper body. The calculation program therefore permits a good integrated determination of the actual wear behaviour of the tipper body and should therefore also be suitable for the practical evaluation of the behaviour of actual abrasive wear systems. (13)

ProWear provides a user-friendly and rapid means for determining the wear rates of steels. The program is available cost-free as a thyssenkrupp web application and can be downloaded at <https://online.thyssenkrupp-steel.com>.

4 thyssenkrupp provides a solution to your wear problem

The perdur® steels produced by thyssenkrupp are wear-resistant products with good workability and an extremely high level of toughness. With hardness ratings of 400 and 450 HBW and sheet

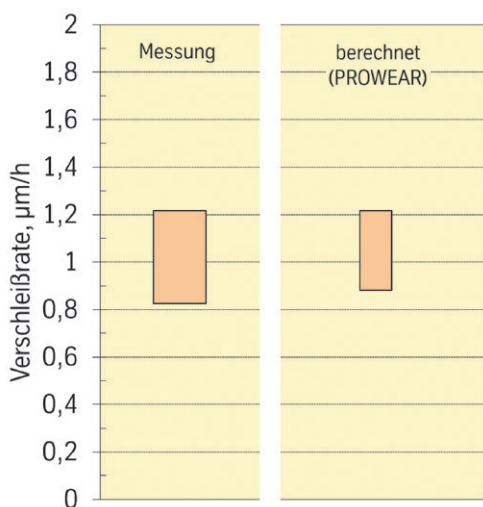


Fig. 19. Comparison of measured and calculated values (13, 14).
Bild 19. Gegenüberstellung gemessener und gerechneter Werte (13, 14).

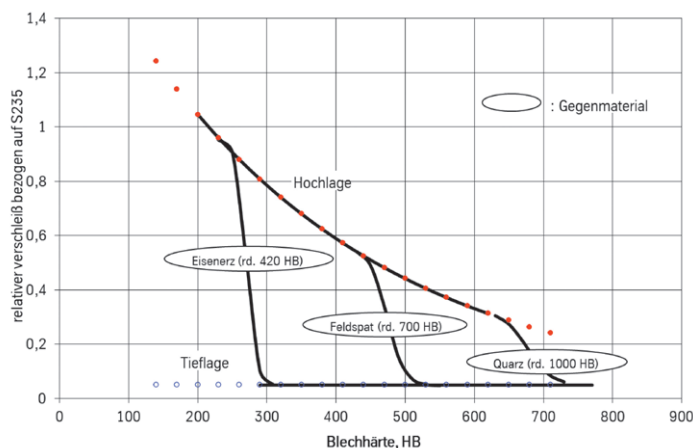


Fig. 18. Wear behaviour for different steel hardnesses and abrasive materials (results of advance calculations) (13).

Bild 18. Verschleißverhalten bei unterschiedlichen Blechhärten und Abrasivstoffen (Ergebnisse von Vorausberechnungen) (13).

delt es sich um einen Mix unterschiedlicher Mineralien, wie Quarz, Pyrit und Feldspat. Dessen mittlere Härte lässt sich auf der Mohsschen Skala zu 6 (rd. 759 HV) angeben. Besonders interessant ist der Verschleiß im sogenannten Hotspot-Bereich der Kippermulde, die den mittleren hinteren Teil einer Kippermulde bezeichnet, in dem bei Be- und Entladen des Schüttguts stetiger Verschleiß vorliegt. Bild 19 zeigt das Ergebnis der Gegenüberstellung zwischen experimentell im Feldversuch ermitteltem Verschleiß und entsprechenden Vorausberechnungen. Die mit ProWear berechneten Verschleißraten entsprechen weitgehend den mittleren Abtragsraten der Kippermulde im kritischen Hotspot-Bereich. Das Rechenprogramm ermöglicht damit eine gute integrale Erfassung des realen Verschleißverhaltens der Kippermulde und sollte damit auch für praxisgerechte Abschätzungen des Verhaltens realer abrasiver Verschleißsysteme geeignet sein. (13)

ProWear ist eine benutzerfreundliche und schnelle Möglichkeit, die Verschleißraten von Stählen zu ermitteln. Das Programm steht als Webanwendung bei thyssenkrupp kostenfrei unter <https://online.thyssenkrupp-steel.com> zur Verfügung.

4 Die Lösung Ihres Verschleißproblems von thyssenkrupp

Die perdur®-Stähle von thyssenkrupp sind verschleißbeständige Stähle mit guter Verarbeitbarkeit und besonders hoher Zähigkeit. Mit Härten von 400 und 450 HBW und Blechdicken von 4,0 bis 8,0 mm eignen sie sich für eine breite Palette von Anwendungen, von moderatem Verschleiß bis hin zu starker Abrasion. Moderne, optimal auf den Dickenbereich abgestimmte Legierungskonzepte mit niedrigem Kohlenstoffäquivalent sorgen für gute Schneid- und Schweißbarkeit. Anwendungen sind verschleißbeanspruchte Konstruktionen und Bauteile, z. B. Kippermulden, Landmaschinen, Schneesäumleisten, Laserteile oder Schrottcontainer (Bild 20).

perdur®-Stähle von thyssenkrupp sind als Bandblech in den in Tabelle 4 dargestellten Abmessungen lieferbar und weisen die in Tabelle 5 angegebenen mechanischen Eigenschaften auf.

perdur®-Stähle lassen sich unter Berücksichtigung ihrer hohen Härte gut kaltumformen. Unter günstigen Bedingungen, z. B. ent-



Fig. 20. Applications for perdur® steels (15). // Bild 20. Anwendungsbeispiele von perdur®-Stählen (15).

thicknesses of 4.0 to 8.0 mm they are suitable for a wide variety of applications ranging from moderate wear to heavy abrasion. Modern alloying techniques with a low carbon equivalent that are optimally adapted to the thickness range ensure good cuttability and weldability. Suitable applications include wear-exposed components and assemblies such as tipper bodies, agricultural machinery, snowplough blades, laser-cut parts and scrap containers (Figure 20).

The perdur® steels produced by thyssenkrupp can be supplied in broad strip form in the sizes listed in Table 4. The corresponding mechanical properties are given in Table 5.

The high hardness levels of perdur® steels make them ideal for cold forming. Under favourable conditions (e. g. smooth deburred edges, slow reshaping, mould lubrication) flawless, crack-free reforming is possible at the minimum bending radii and mould widths listed in Table 6.

The perdur® steels manufactured by thyssenkrupp are also suitable for machining, heat treatment, thermal cutting and welding. Further information on wear-resistant perdur® steels from thyssenkrupp can be found at www.thyssenkrupp-steel.com/de/bandblech

perdur® wear-resistant sheet steel Verschleißbeständiges Bandblech perdur®		
Grade designation / Stahlsortenbezeichnung	Thickness from to Dicke von bis [mm]	Max. width Max. Breite [mm]
perdur® 400	4.0 ≤ t ≤ 8.0	1,500
perdur® 450	4.0 ≤ t ≤ 6.0	1,500
	6.0 ≤ t ≤ 8.0	1,600

Length: min. 2,000 mm, max. 16,000 mm. Further dimensions available on request.
Länge: Mind. 2.000 mm, max. 16.000 mm. Weitere Abmessungen auf Anfrage.

Table 4. Available sizes of perdur® steel products (15).
Tabelle 4. Lieferbare Abmessungen von perdur®-Stählen (15).

gratete sowie kerbfreie Kanten, langsame Umformung, Schmierung der Matrize, sind rissfreie Umformungen mit den in Tabelle 6 angegebenen Mindestbiegeradien und Matrizenweiten möglich.

Die perdur®-Stähle von thyssenkrupp eignen sich darüber hinaus zum Zerspanen, Wärmebehandeln, thermischen Schneiden und Schweißen. Weitere Informationen zu den verschleißbeständigen perdur®-Stählen von thyssenkrupp finden man unter www.thyssenkrupp-steel.com/de/bandblech

Mechanical properties // Tested in the direction of rolling, delivery condition: thermomechanically reshaped and rapidly cooled
Mechanische Eigenschaften // Prüfung in Walzrichtung, Lieferzustand: thermomechanisch umgeformt und beschleunigt abgekühlt

Grade designation / Stahlsortenbezeichnung	Brinell hardness Brinellhärte [HBW]	Impact testing Kerbschlagarbeit		Yield strength Streckgrenze R _{p0.2} typ. [Mpa]	Tensile strength Zugfestigkeit R _m typ. [Mpa]	Breaking elongation Bruchdehnung A typ.
		KV min. [J] at -20 °C	KV typ. [J] at -40 °C			
perdur® 400	370-430	27	45	1100	1300	11
perdur® 450	420-480	27	40	1200	1450	10

Table 5. Mechanical properties of perdur® steels (15). // Tabelle 5. Mechanische Eigenschaften von perdur®-Stählen (15).

Minimum bending radii and mould widths for cold reforming
Mindestbiegeradien und -matrizenweiten beim Kaltumformen

Grade designation / Stahlsortenbezeichnung	Nominal thickness Nennstärke [mm]	r/t ⊥	r/t	W/t ⊥	W/t
perdur® 400	4.0-8.0	3.0	4.0	10.0	10.0
perdur® 450	4.0-8.0	4.0	4.5	10.0	12.0

⊥ = bend line vertical to rolling direction; || bend line in rolling direction; W = inside width of mould; r/t = radius/nominal thickness
⊥ = Biegelinie senkrecht zur Walzrichtung; || Biegelinie in Walzrichtung; W = lichte Matrixweite; r/t = Radius / Nennstärke

Table 6. Minimum bend radii and mould widths for the cold reforming of perdur® steels (15).
Tabelle 6. Mindestbiegeradien und -matrizenweiten beim Kaltumformen von perdur®-Stählen (15).

References / Quellenverzeichnis

- (1) GfT – Arbeitsblatt 7 – Tribologie – Verschleiß, Reibung – Definitionen, Begriffe, Prüfung, Seite 6. https://neu.gft-ev.de/wp-content/uploads/2002_AB_7_Tribologie.pdf (Abruf: 02.03.2021).
- (2) Reiter, R.: Schadensursache Verschleiß. Fachtagung Schadensfalluntersuchungen, Essen, 2007.
- (3) Reiter, R.: Schadensursache Verschleiß – ein kaum bekanntes Problem. Vortragsreihe – Wissenschaft, Technik und Ethik, Clausthal-Zellerfeld, 2010.
- (4) ASTM G65-16, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.
- (5) Heet, C.: Verschleißverhalten einer PPA-geschweißten FeCrC-Legierung mit dem Ziel der fein dispers gerichteten Hartphasenerstarrung. Vortrag Promotionskolleg „Oberflächentechnik und Oberflächenfunktionalisierung“, TU Clausthal, 13.06.2012, Clausthal-Zellerfeld.
- (6) Heet, C.: Hochtemperaturstrahlverschleißuntersuchungen an einphasigen und mehrphasigen metallischen Werkstoffen. Dissertation, Clausthal, Papierflieger Verlag, 2015, S. 58ff.
- (7) Uetz, H.: Abrasion und Erosion – Grundlagen, Betriebliche Erfahrungen, Verminderung. Carl Hanser; ISBN 978-3-446-14215-2; S.74, 132ff.
- (8) Kern, A.: Habilitationsschrift am Fachbereich 6 der TU Berlin (1997).
- (9) Habig, K.-H.: Verschleiß und Härte von Werkstoffen. Hanser Verlag, München (1990).
- (10) Zum Gahr, K.H.: Reibung und Verschleiß bei metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen. DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel (1987), S. 21–65.
- (11) Pigors, O.: Verschleißverhalten von Werkstoffen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1985), S. 92–105.
- (12) Pircher, H.; Lendowski, H.; Dißelmeyer, H.: Reibung und Verschleiß bei metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen. Proc. DGM-Symposium Bad Nauheim 1986, S. 147–157.
- (13) Feinle, P.; Kern, A.; Schriever, U.: Verschleißverhalten hochfester Sonderbaustähle XAR. GfT-Tagung 2006.
- (14) Röper, F.: Untersuchung des abrasiven Verschleißverhaltens an Hochleistungsstählen. Studienarbeit an der FH-Mannheim, 2001.
- (15) thyssenkrupp Steel Europe AG: Homepage und Produktinformation perdur®. Abgerufen unter www.bandblech.de

Authors / Autoren

Prof. Dr. Andreas Kern, Dr. Christian Heet, Dr. Franz Domenic Boos, Błażej Kempinski M.Sc., Dr. Dennis Maximilian Röllinger, thyssenkrupp Steel Europe AG, Duisburg