

# **SGS-GRUPPE** **DEUTSCHLAND**

**Analytische Methoden und Verfahren in der Tribologie**

Dr. Olaf Günnewig

WHEN YOU NEED TO BE SURE

**SGS**

### DATEN & FAKTEN



**N°1**  
WELTWEIT DIE  
NUMMER EINS

**85,000**  
MITARBEITER

**1,800**  
STANDORTE UND  
LABORE



**14**  
BRANCHEN, DIE  
SGS WELTWEIT  
BEAUFTRAGEN

**1878**  
GRÜNDUNG IN  
ROUEN (F)

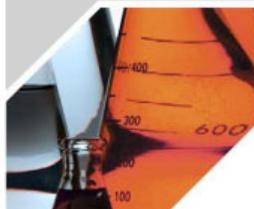
LANDWIRTSCHAFT  
UND LEBENSMITTEL



AUTOMOTIVE



CHEMIKALIEN



BAUWERBE



KONSUMGÜTER UND  
HANDEL



ENERGIE



INDUSTRIE-  
FERTIGUNG



**BRANCHEN**  
**WELTWEIT**

LIFE SCIENCES



LOGISTIK



BERGBAU



ÖL UND GAS



ÖFFENTLICHER  
SEKTOR



FINANZWESEN



LUFTFAHRT





## ■ Dienstleistungen

- Fehler- und Schadensanalytik/Task Force Support
- Gutachten für Versicherungen und Gerichte
- Qualitätssicherung/Freigabeprüfungen/F&E-Unterstützung
- Entwicklung neuer Prüf- und Analyseverfahren
- Fehlersimulation und Alterungsprüfungen

## ■ Unsere Kompetenzen

- Ein multidisziplinäres Team aus hochqualifizierten Experten der Fachrichtungen
  - Physik
  - Elektrotechnik
  - Chemie und Chemietechnik
  - Werkstofftechnik (Metalle und Polymere),
  - Maschinenbau
  - Luft- und Raumfahrttechnik
  - Mineralogie

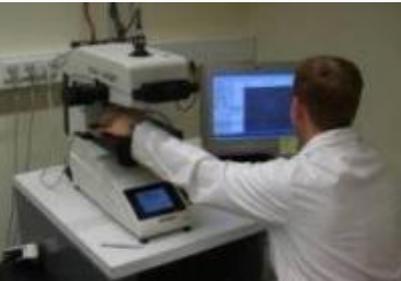
bearbeitet in jedem Jahr fast 1.000 Schadensfälle.





### ■ Analytische Verfahren

- Metallographie / Materialographie / Präparation
- Topographie und Werkstoffdiagnostik
  - Lichtmikroskopie und Digitalmikroskopie
  - Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit EDX- bzw. WDX-Analytik
  - Focused Ion Beam (FIB)
  - Transmissions-Elektronenmikroskopie (TEM)
- Oberflächenanalytik
  - Zeitaufgelöste Sekundärionen-Massenspektroskopie (TOF-SIMS)
  - Dynamische Sekundärionen-Massenspektroskopie (D-SIMS)
  - Röntgenangeregte Photoelektronenspektroskopie (XPS)
  - Auger Elektronen Spektroskopie (AES)
  - Röntgendiffraktometrie (XRD)
- Zerstörungsfreie Prüfung (NDT)
  - Digitale Röntgenprüfung (Radioskopie)
  - 3D-Computertomographie (inkl. Reverse Engineering)
  - Ultraschallprüfung und Ultraschallmikroskopie (SAM)
  - Thermographie



### ■ Analytische Verfahren

- Chemische Analytik
  - Nasschemische Werkstoffanalytik (ICP-OES, ICP-MS)
  - Gaschromatographie (GC) mit unterschiedlicher Detektion (z.B. MS)
  - Hochleistungs-Flüssigkeits-Chromatographie (HP-LC)
  - Ionenchromatographie (IC)
- Kunststoffanalytik
  - Infrarotspektroskopie (FT-IR/ATR FT-IR/IR Mikroskopie)
  - Thermische Analyse (TGA)
  - Differentialthermoanalyse (DSC)
  - Dynamisch-Mechanische Analyse (DMA)
  - Gel-Permeations-Chromatographie (GPC)
- Elektroniklabor
  - Netzwerkanalyse und zeitaufgelöste Signalanalysen (5GS)
  - Mikroohm-Messungen (Dry Circuit), LCR-Messungen
  - Halbleiterprüfungen (Spreading Resistance-Profiling (SRP), OBIRCH)
- Mechanisch-Technologische Prüfungen
  - Zug- und Druckprüfungen (mit Temperierung) sowie Kerbschlagversuch
  - Mikro- und Makrohärteprüfung

## Fehler

= Störung der Funktion oder dekorative Mängel an einem Produkt

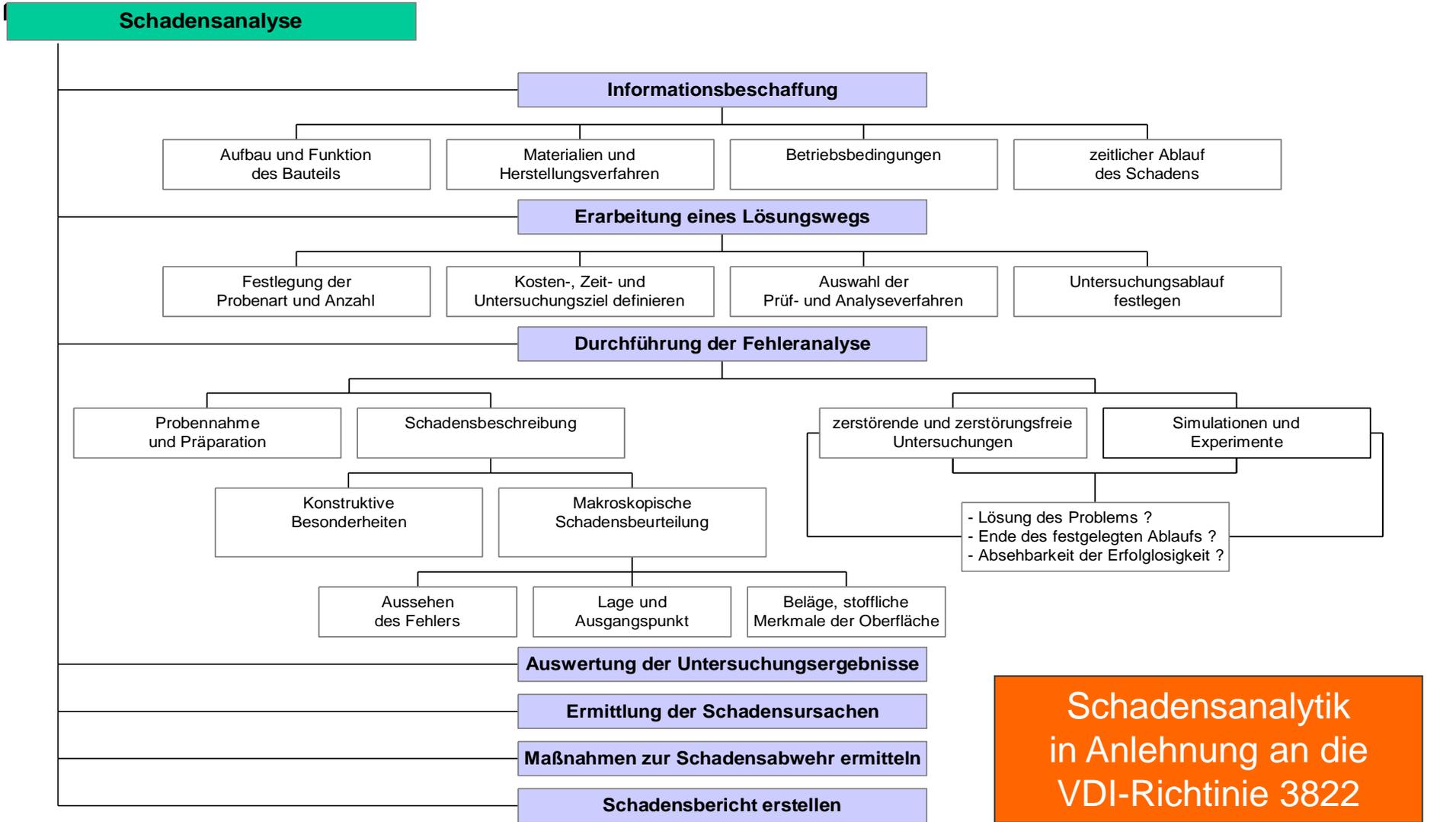
## Schaden

= Veränderung an einem Produkt, durch die seine vorgesehene Funktion wesentlich beeinträchtigt oder unmöglich gemacht wird. Der Schaden wird oft erst beim Endkunden bemerkt und geht in der Regel weit über den Wert des schadhaften Teils hinaus.

## Schadensanalyse

= Systematische Untersuchungen und Prüfungen zur Ermittlung von Schadensablauf und –ursache

Voraussetzung für den Erfolg einer Schadensanalyse ist eine **systematische Herangehensweise**, insbesondere bezüglich der Wahl des Probenmaterials, der Beschaffung von Informationen, der Erarbeitung eines Lösungsweges sowie schließlich der Durchführung der Fehleranalyse.



**Schadensanalytik  
in Anlehnung an die  
VDI-Richtlinie 3822**

## **Gemeinsame Erarbeitung eines Lösungsweges mit dem Kunden**

- = Festlegung der Probenart und Anzahl (inkl. Referenzproben)
- = Auswahl der Prüf- und Analyseverfahren
- = Optimierung des Untersuchungsumfanges
- = Festlegung der Bearbeitungsfolge (ggf. Priorisierung)
- = Kostenabschätzung (Angebot)
- = Bestellung durch den Kunden
- = Terminplanung, Berichtslayout und Zwischenergebnisse

## **Auswahl geeigneter Prüf- und Analyseverfahren**

- = Zur Lösung der meist komplexen Probleme stehen eine Vielzahl von Analysemethoden zur Verfügung
- = In Abstimmung mit dem Auftraggeber erfolgt eine zieloptimierte Auswahl mit einem ökonomisch vertretbaren, möglichst geringen Kosten- und Zeitaufwand zur gewissenhaften Aufklärung der Fehler- oder Schadensursache

## **Tribologie**

- Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.
- Tribologie trägt durch Minderung von Verschleiß und Optimierung von Reibungsbedingungen zur Erhaltung von Werten bei.

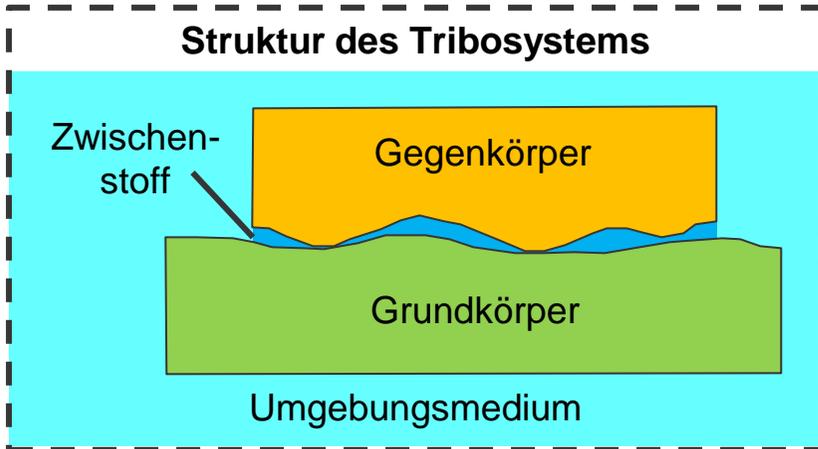
## **Tribologisches System (Tribosystem)**

- Das tribologische System beinhaltet alle an einer tribologischen Beanspruchung beteiligten stofflichen Komponenten und ihre Eigenschaften mit den sich bei ihnen ergebenden Veränderungen sowie die für die Beanspruchung charakteristischen Vorgänge und Größen.

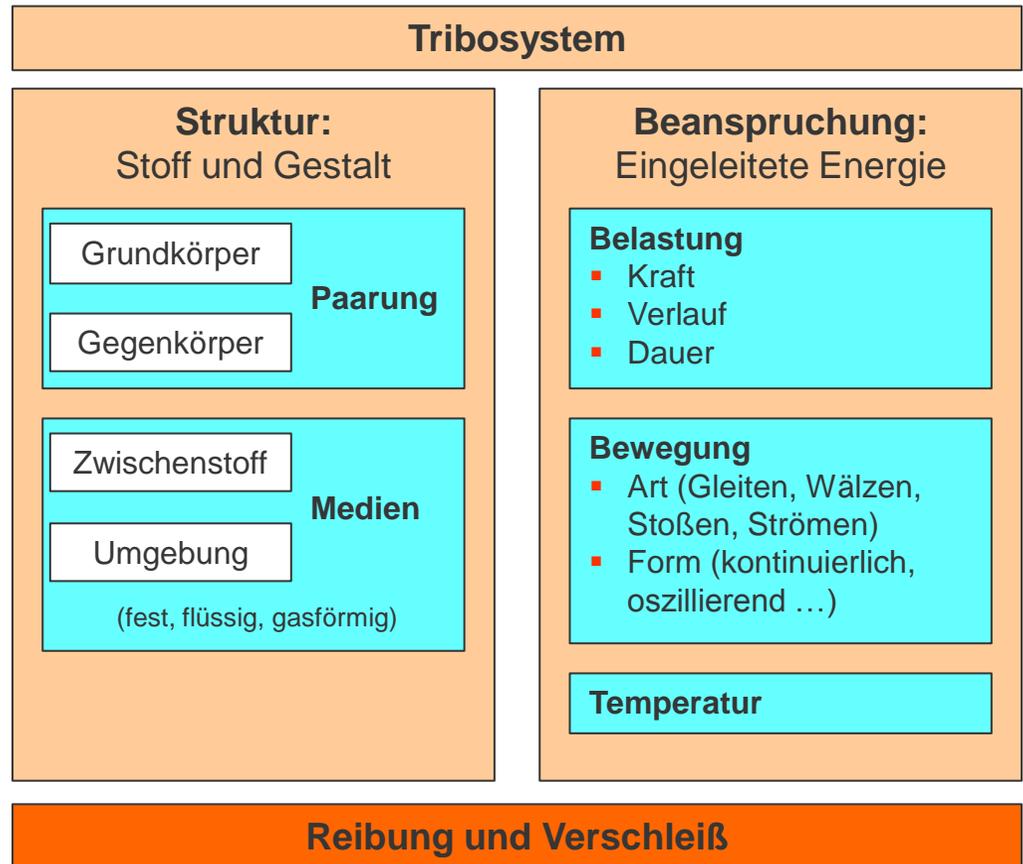
Beanspruchung



### Struktur des Tribosystems

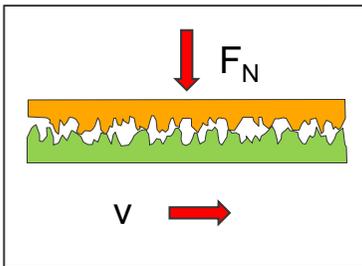


### Kennzeichnende Elemente eines Tribosystems

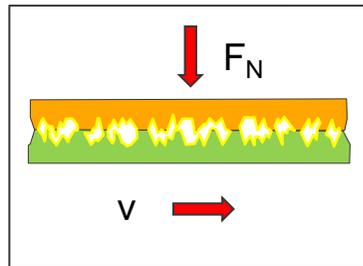


### Reibungszustände

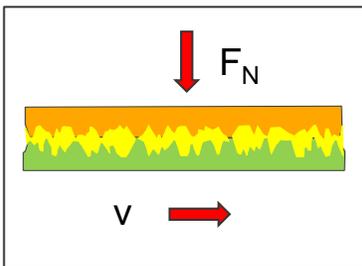
Festkörperreibung



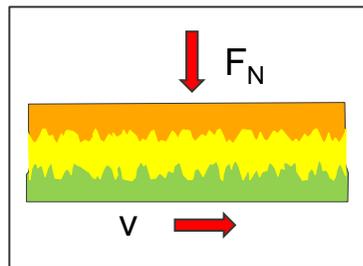
Grenzreibung



Mischreibung

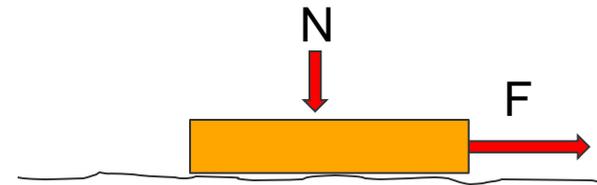


Flüssigkeitsreibung



### Reibungskoeffizient

$$F = \mu N$$

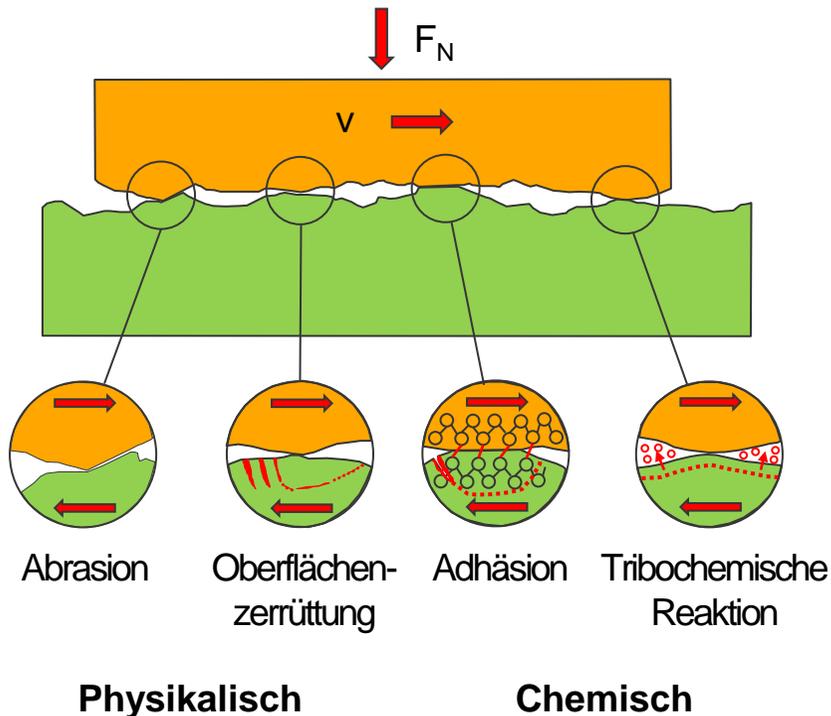


Der Reibungskoeffizient  
 $\mu = F/N$

### Der Reibungskoeffizient hängt ab von

- Oberflächenrauheit
- Schmiermittel / Zwischenstoff
- Oberflächenchemie
- Kontaktstress
- Kontaktgeometrie
- Umgebungsbedingungen
- Temperatur
- Gleitgeschwindigkeit
- Zeit, ...

### Verschleißmechanismen



- **Adhäsion**

Bildung von Haftverbindungen an den Grenzflächen, wobei der Verschleiß durch die nachfolgende Trennung der Grenzflächen auftritt (Materialübertrag: z.B. Kaltverschweißen)

→ *Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen, ...*

- **Abrasion**

Abtrag von Material infolge von furchenden oder ritzenartigen Beanspruchungen (Mikrozerspannung)

→ *Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen, ...*

- **Oberflächenzerrüttung**

Ermüdung und Rissbildung in oberflächennahen Bereichen infolge der tribologischen Wechselbeanspruchung

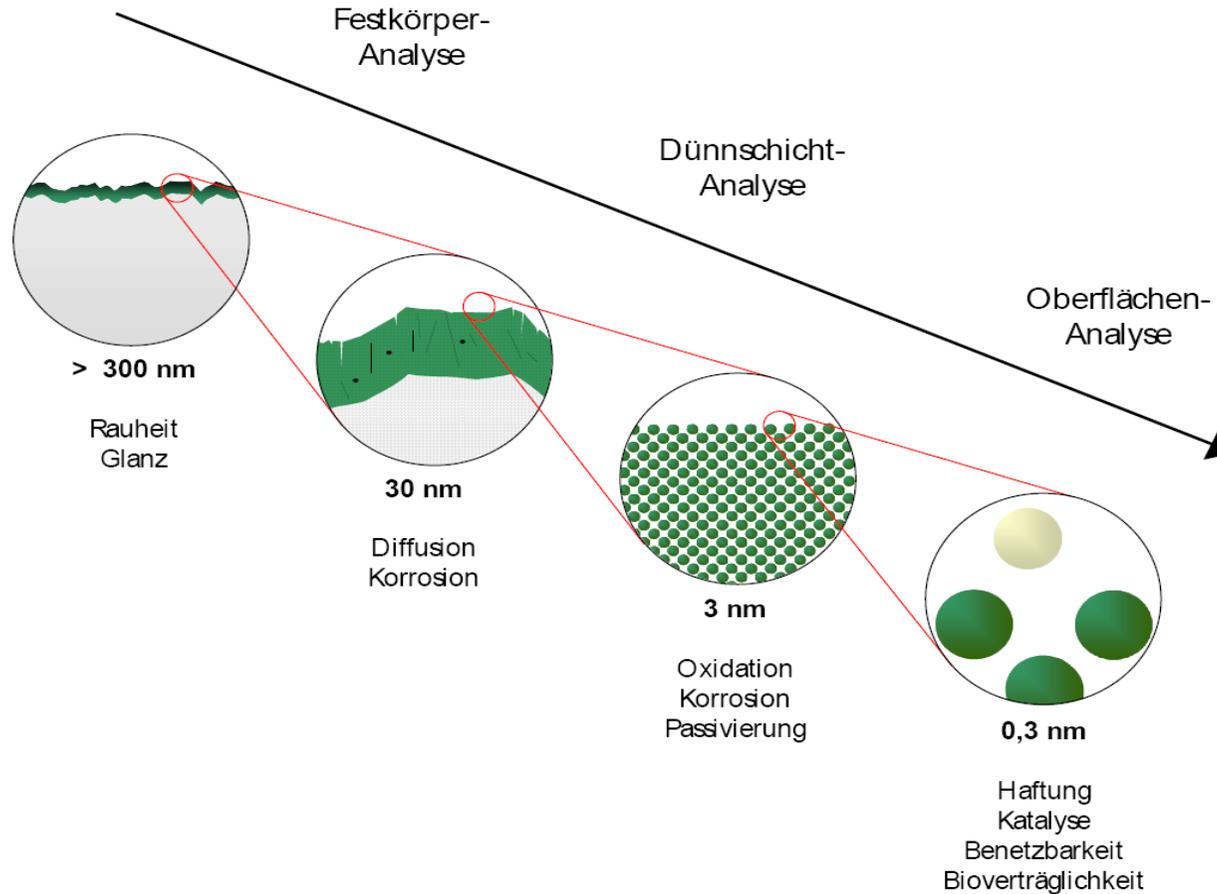
→ *Risse, Grübchen, ...*

- **Tribochemische Reaktion**

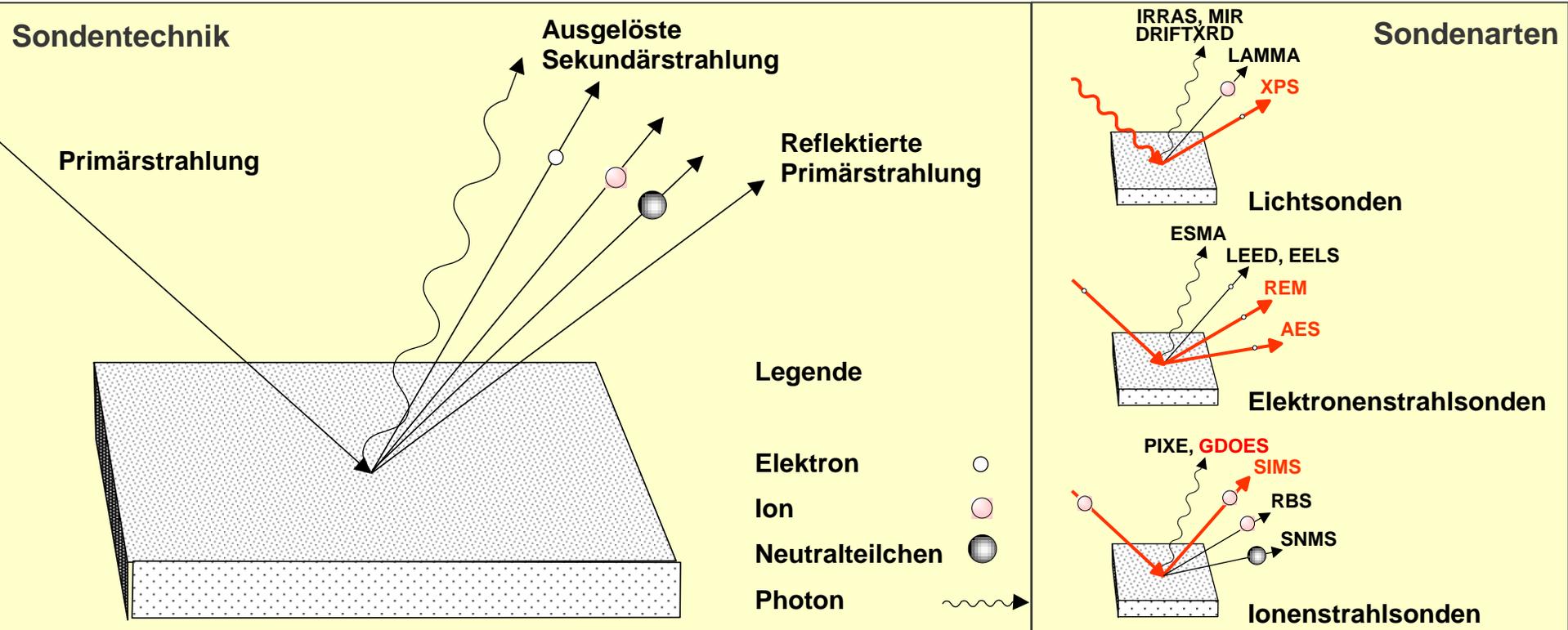
Infolge der tribologischen Beanspruchung induzierte chemische Reaktion zwischen Grundkörper, Gegenkörper und angrenzenden Medien unter Entstehung von Reaktionsschichten oder -partikeln

→ *Reaktionsprodukte (Schichten, Oxidation, Partikel) ...*

### Die Charakterisierung der Werkstoffgrenzschichten erfordert oberflächenanalytische Methoden



1. Beschuss des zu untersuchenden Objekts (Probe) mit einer Sondenstrahlung = **Primärstrahlung**.
2. Der bestrahlte Probenbereich wird von der Primärstrahlung angeregt. Hierbei kann es sich um Elektronen, Ionen, Neutralteilchen oder Photonen handeln.
3. Dieser Probenbereich emittiert die **Sekundärstrahlung** (Elektronen, Ionen, Neutralteilchen, Photonen)
4. Die Sekundärstrahlung wird detektiert. Sie enthält Informationen über die beschossenen Objektbereiche

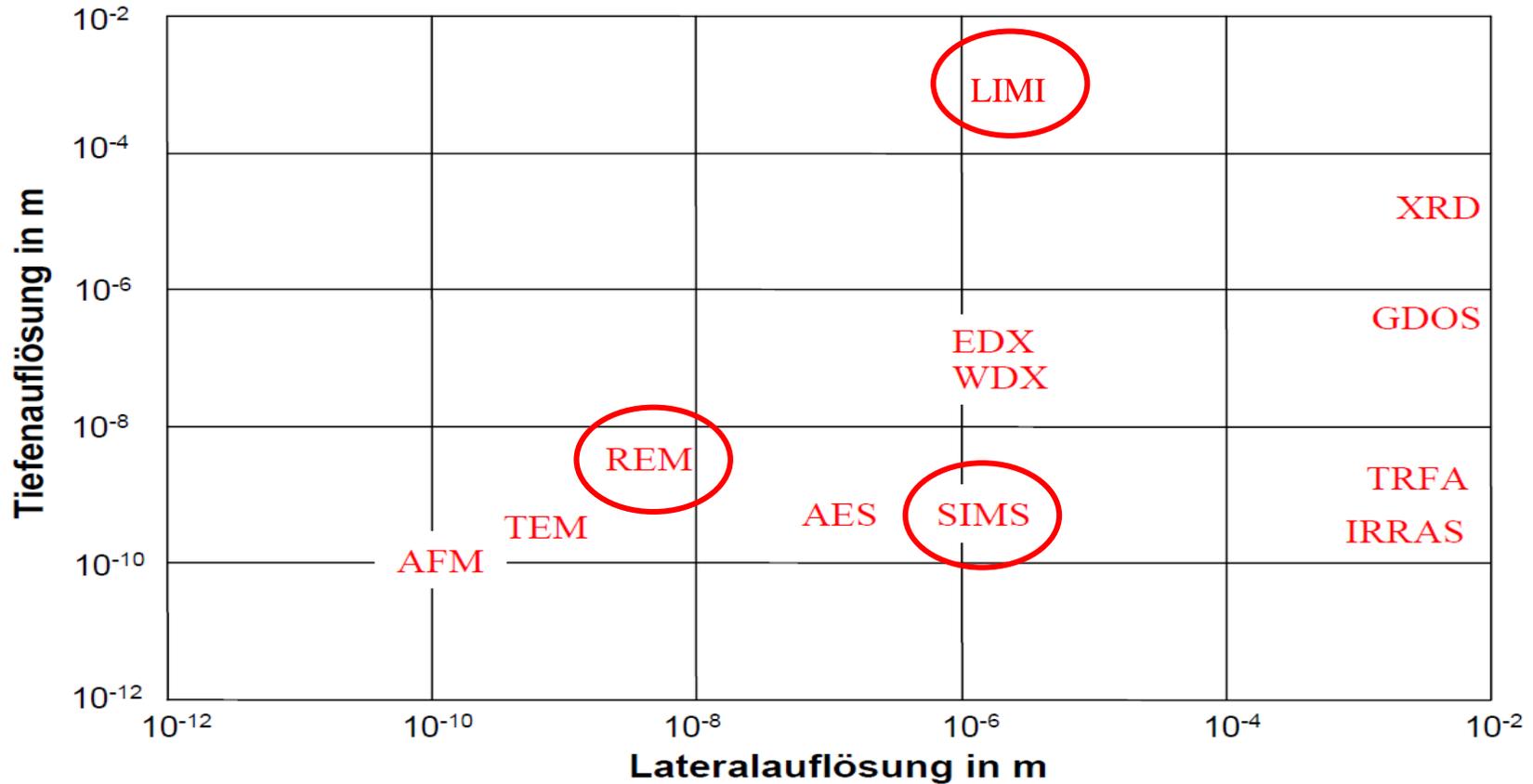


## Ausgewählte Sondenverfahren und Verfahrensvarianten der Oberflächen- und Dünnschichtanalytik

Abkürzung	Verfahrensname
AES (SAM)	Augerelektronenspektroskopie (Scanning-Auger-Mikrosonde)
AFM	Atomic Force Microscopy (Raster-Kraftmikroskopie)
MFM	Magnetic Force Microscope (Magnetkraft-Mikroskop)
EFM	Electrostatic Force Microscope (elektrostatisches Kraftmikroskop)
LFM	Lateral Force Microscope (Lateralkraft-Mikroskop)
EELS (EEVS)	Electron Energy Loss Spektroskopie (Elektronen-Energieverlustspektroskopie)
ESMA (EMPA) ~ EDX ~ WDX	Elektronenstrahlmikroanalyse (Electron MicroProbe Analysis) Energiedispersive Röntgenspektroskopie Wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie
GDOS	Glow Discharge Optical Spectroscopy (Glimmlampenemissions-Spektralanalyse)
GDMS	Glow Discharge Mass Spectroscopy (Glimmladungsmassen-Spektralanalyse)
IRRAS	Infra-Red Reflection Absorption Spectroscopy (Infrarot-Reflexions-Absorptionsspektroskopie)
LAMMA (LIMS)	Laser-Mikrosonden-Massenanalyse (Laser Ionization Mass Spectrometry)

Abkürzung	Verfahrensname
PTS	Gepulste Photothermische Spektroskopie
RBS	Rutherford-Backscattering-Spectroscopy (Rutherford-Rückstreu-Spektroskopie)
REM (SEM)	Rasterelektronenmikroskopie (Scanning Electron Microscopy)
SIMS	Sekundärionenmassenspektrometrie
TOF-SIMS	Time-Of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (Flugzeit-Sekundärionenmassenspektrometrie)
SNMS	Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie
STM	Scanning Tunneling Microscopy
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie
TRFA (TXRF)	Totalreflexionsröntgenfluoreszenzanalyse (Total Reflection X-Ray Fluorescence)
XPS	X-Ray Photoelectron Spectroscopy (Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie)
XRD	X-Ray-Diffraction (Röntgendiffraktometrie)

# Verfahren in der Oberflächenanalytik



- |      |                                   |     |   |
|------|-----------------------------------|-----|---|
| LIMI | Lichtmikroskopie                  | TEM | Transmissionselektronenmikroskopie            |
| REM  | Rasterelektronenmikroskopie       | XPS | Röntgenangeregte Photoelektronenspektroskopie |
| EDX  | Energiedispersive Röntgenanalyse  | AES | Augerelektronenspektroskopie                  |
| SIMS | Sekundärionen-Massenspektrometrie | AFM | Atomic Force Microscopy                       |

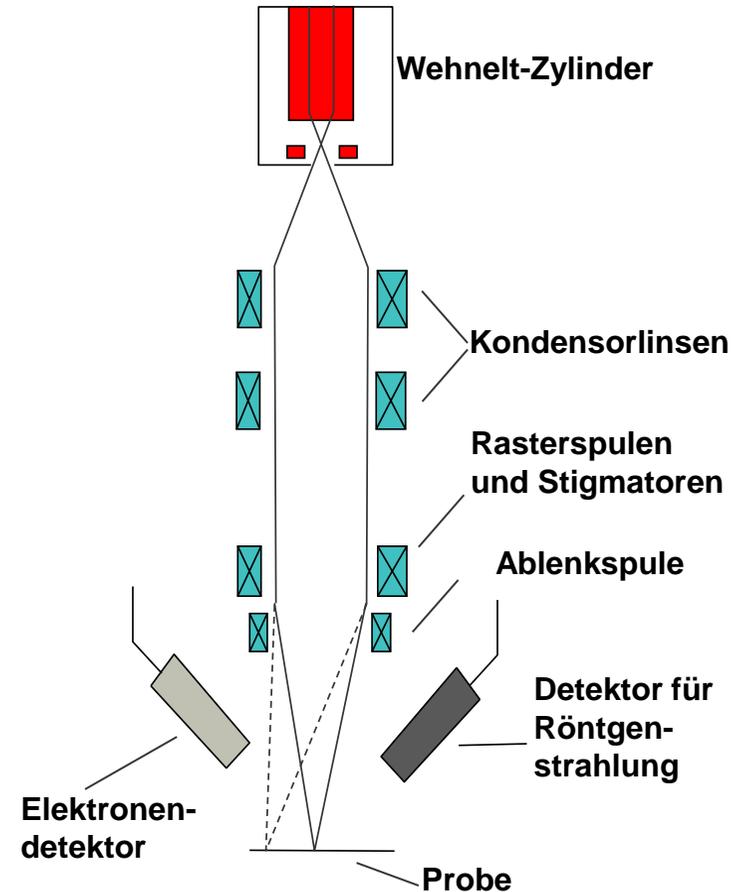
## ■ Rasterelektronenmikroskopie (REM / SEM)

### Detektor für Elektronen: Topographie / Material

- Hohe laterale Auflösung ( $< 5 \text{ nm}$ )
- Hohe Tiefenschärfe
- Präzise Messung von Längen
- SE-Detektor: Topographiekontrast
- BSE-Detektor: Materialkontrast

### Detektor für Röntgenstrahlung: EDX-Analyse

- Laterale und vertikale Auflösung:  $0,1 \dots 1 \text{ }\mu\text{m}$
- Laterales Element-Mapping, vertikale Elementprofile (letztere nur am Querschliff)
- Nachweisgrenze: etwa  $0,1 \text{ at.-%}$
- Detektierbare Elemente: B / C bis U
- Semiquantitative Analyse



## ■ Rasterelektronenmikroskopie (REM / SEM)

### BSE-Detektor (Rückstreubereich)

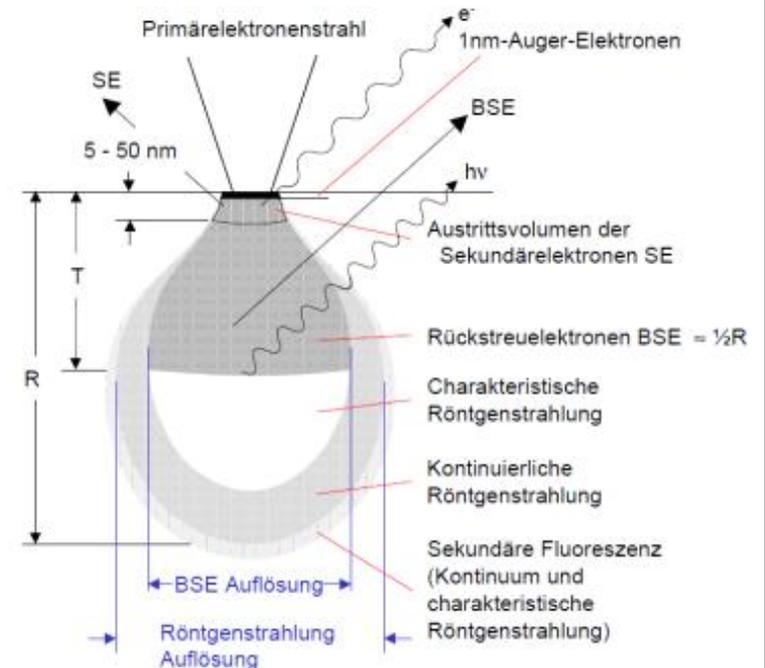
- Elektronenrückstreuung durch elastische Streuung von Primärelektronen an Atomen im oberflächennahen Bereich.
- Intensität abhängig von Einfallswinkel und vor allem von der Ordnungszahl (→ Materialkontrast).

### SE-Detektor (Sekundärelektronenbereich)

- Herausschlagen von schwach gebundenen Sekundärelektronen durch Primärelektronen entlang ihres gesamten Weges. Auf Grund der geringen Energie der Sekundärelektronen (<50 eV) Austritt aber nur aus oberflächennahem Bereich möglich.
- Intensität abhängig vom Winkel der Oberflächennormale und Primärstrahlrichtung (→ Topographiekontrast).

### EDX-Detektor (Röntgenbereich)

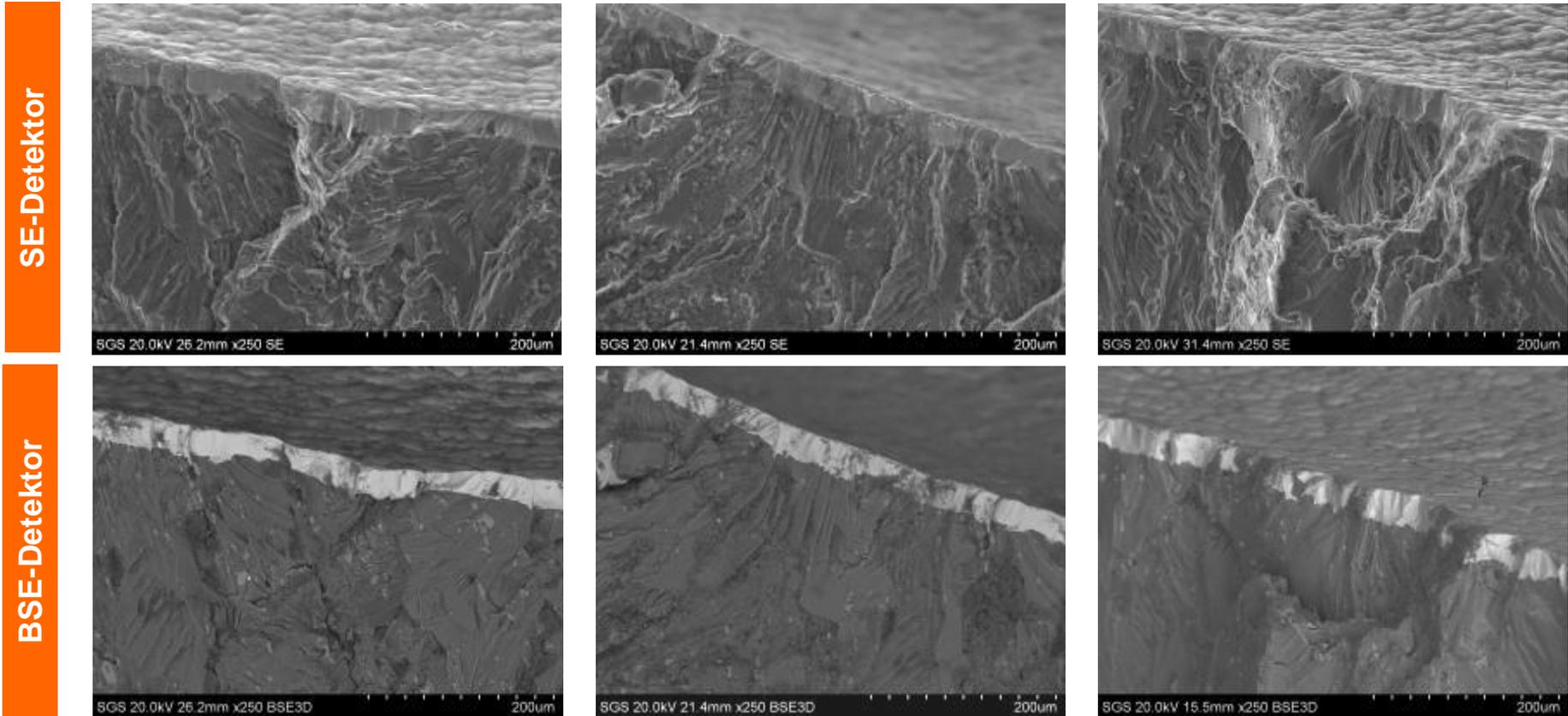
- Emittieren von Röntgenstrahlung durch Wechselwirkung der Primärelektronen mit den Atomen des Probenmaterials.
- Energieabhängige Analyse der erzeugten Röntgenstrahlung mit dem Verfahren der EDX-Analytik.
- Anregungstiefe abhängig von Energie, Material und Dichte.



R: Maximale Eindringtiefe der Primärelektronen  
T: Maximale Austrittstiefe der Rückstreuerelektronen BSE = 1/2 R  
Auflösungsgrenze der Röntgenstrahlung = R  
Auflösungsgrenze der sekundären Fluoreszenz > R

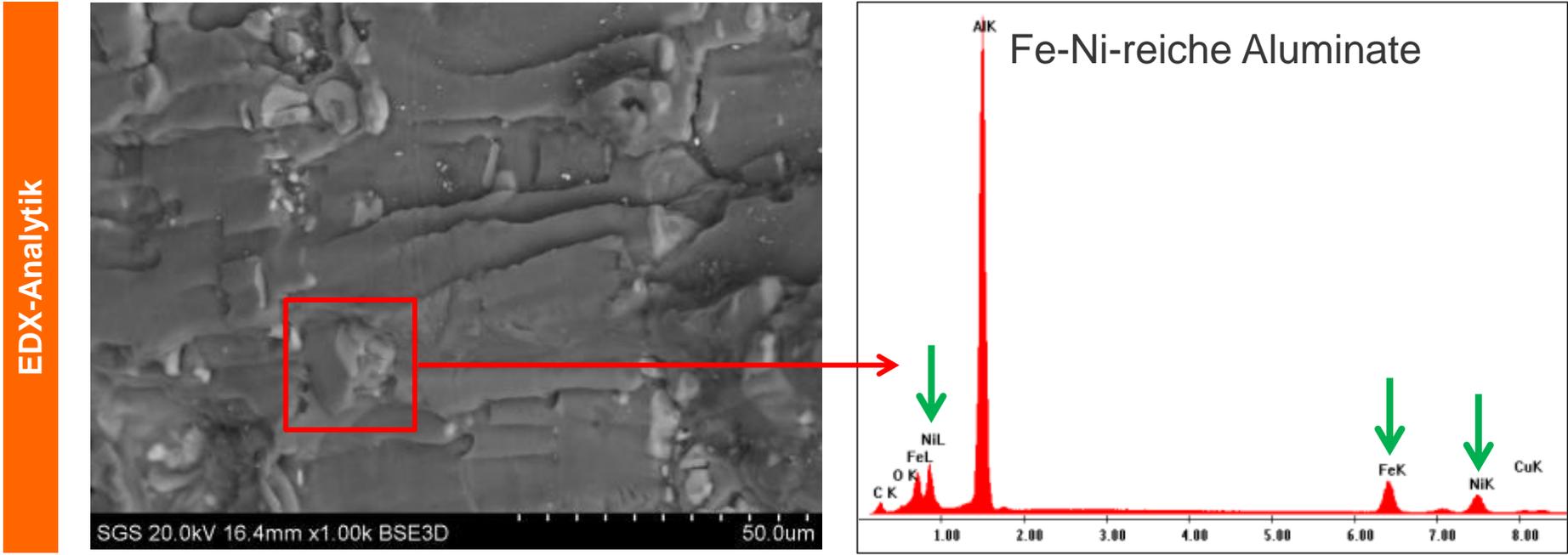
- Rasterelektronenmikroskopie (REM / SEM)**

(Spröde gebrochenes Aluminium-Bauteil mit Nickel-Beschichtung und Ausscheidungen im Aluminium)



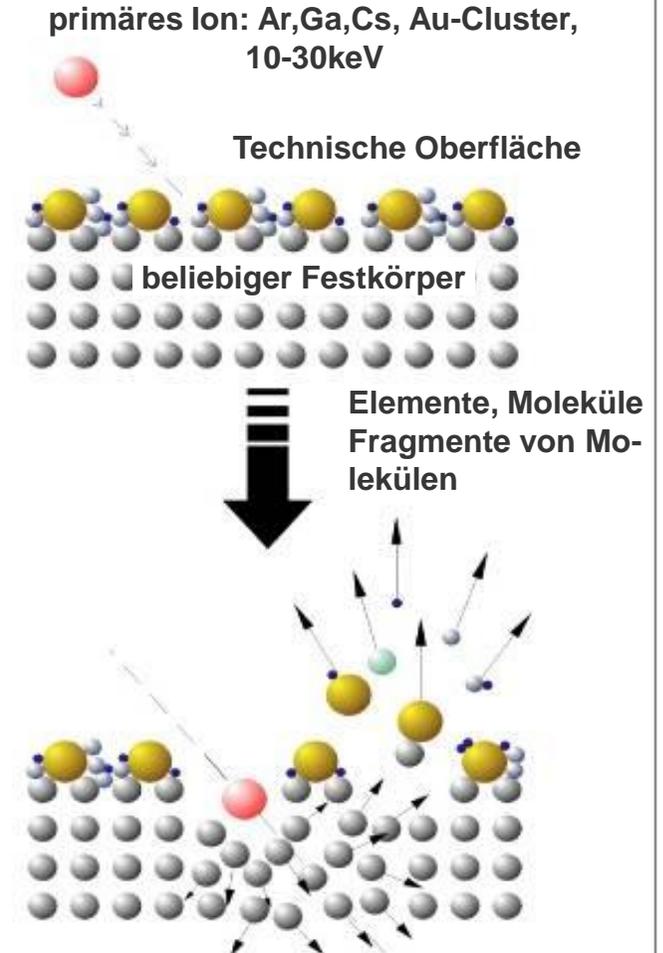
- **Rasterelektronenmikroskopie (REM / SEM)**

(Spröde gebrochenes Aluminium-Bauteil mit Nickel-Beschichtung und Ausscheidungen im Aluminium)



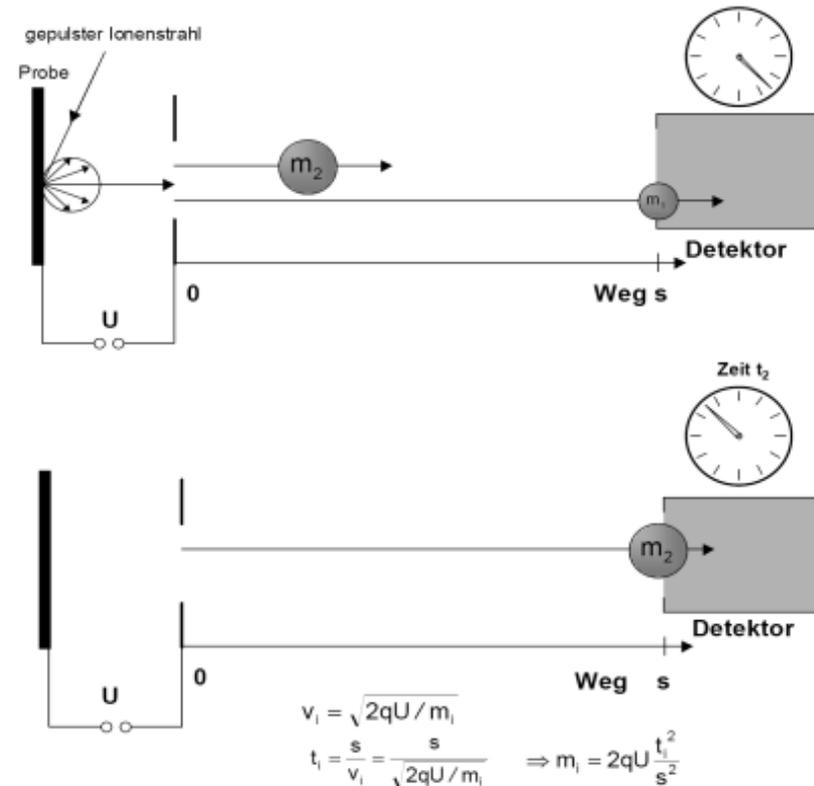
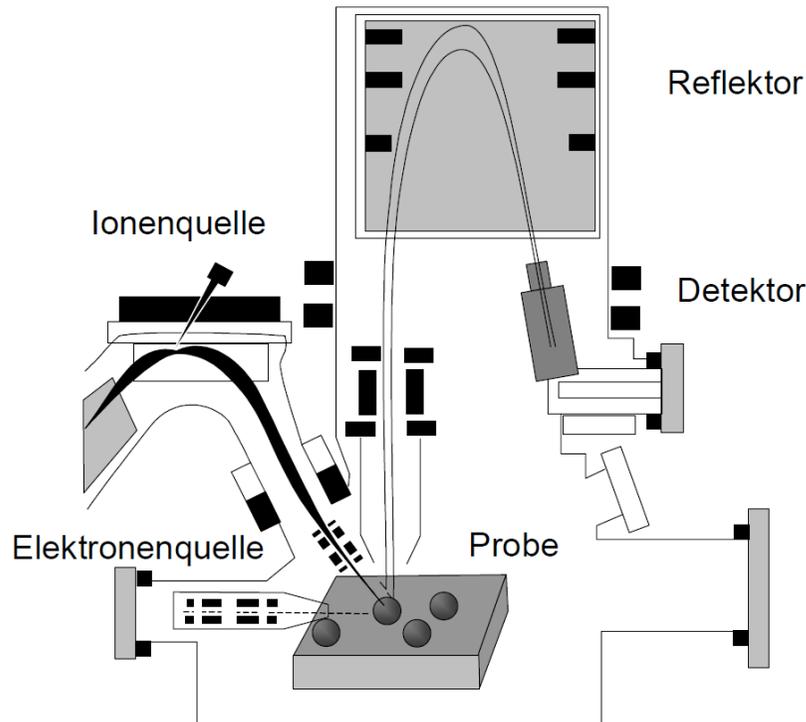
## ■ Zeitaufgelöste Sekundärionen-Massenspektrometrie (TOF-SIMS)

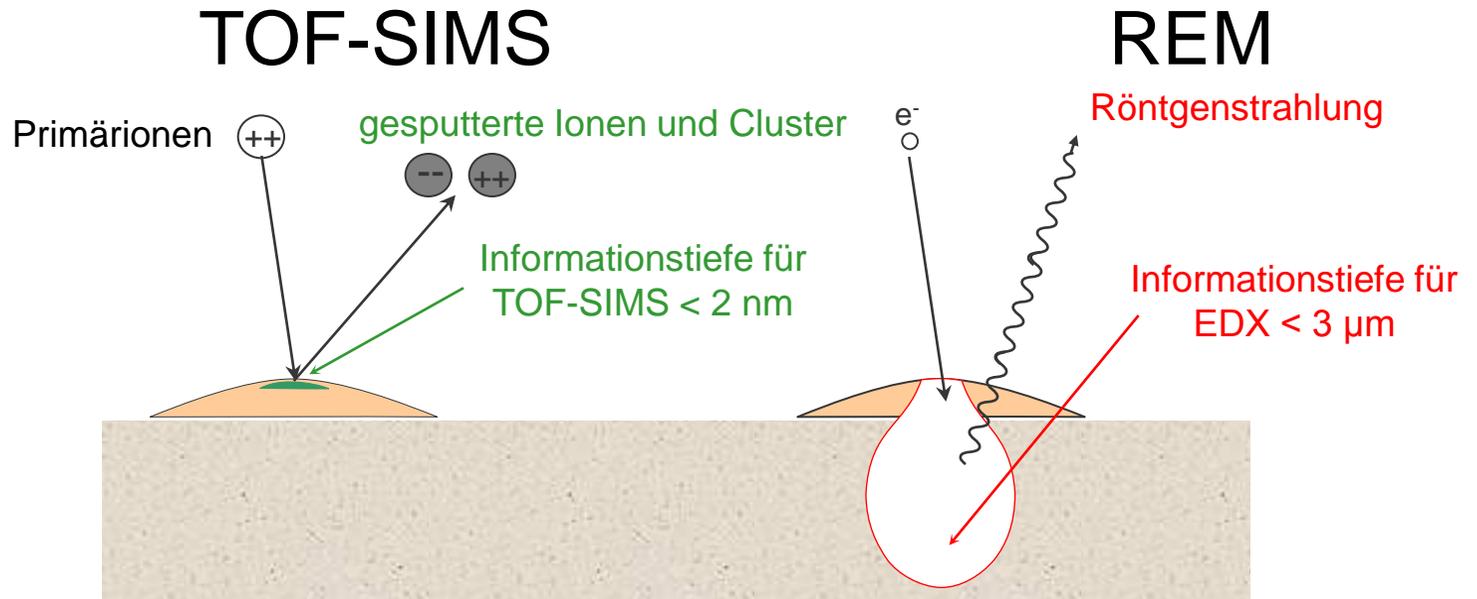
- Desorption charakteristischer „Fragmente“ aus den obersten Atomlagen der Probe (Elemente, Ionen, Moleküle, Fragmente von Molekülen)
- Chemischer Aufbau der Oberfläche und Bestimmung der lateralen Element- und Molekülverteilung („chemical mapping“)
- Nachweis aller Elemente und Isotope sowie organischer Verbindung im Spurenbereich
- Laterale Auflösung:  $< 1 \mu\text{m}$
- Tiefenauflösung:  $0,5 \dots 2 \text{ nm}$
- Nachweisgrenze: ppb ... ppm



### ■ Zeitaufgelöste Sekundärionen-Massenspektrometrie (TOF-SIMS)

In dem TOF-SIMS Verfahren wird die Probe mit einem gepulsten Ionenstrahl angeregt. Von der Probe emittierte Sekundärionen werden in einem Flugzeitmassenspektrometer analysiert. Das Prinzip dieses Spektrometers beruht darauf, dass die Geschwindigkeit  $v$  der Sekundärionen, die in einem elektrischen Feld die gleiche Energie  $E$  aufnehmen, mit zunehmender Masse  $m$  sinkt. Somit brauchen schwerere Sekundärionen größere Zeiten, um eine nachfolgende feldfreie Driftstrecke zu durchlaufen. (Abb. rechts). Durch die Messung der Flugzeiten der Sekundärionen bis zum Detektor kann dann ihre Masse sehr genau berechnet werden (Abb. links).





Quelle: Argon Strahl, sputternd  
 Signal: Ionen und Cluster  
 Informationstiefe: < 2 nm  
 Sättigung der  
 Signalintensitäten: etwa 3 Monolagen

Elektronen  
 Röntgenstrahlung  
 < 3 μm  
 einige μm Dicke

## Hochempfindlicher Nachweis von:

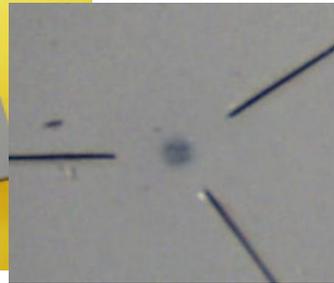
- ◆ allen Elementen
- ◆ Silikonen
- ◆ Fetten/Diglyceriden
- ◆ Additiven
- ◆ ionische/nichtionische Tenside
- ◆ polymeren Verbindungen
- ◆ Weichmachern
- ◆ Schmiermitteln
- ◆ Zieh- und Stanzölen
- ◆ ...

Substanz	Probe 1	Probe 2	Probe 3
<u>Additive:</u>			
Irgafos 168	■	■	□
Irganox 1010	■	■	—
Tinuvin 770	—	—	■
<u>Alkali / Erdalkalimetalle:</u>			
Calcium	—	□	■
Kalium	—	■	■
Magnesium	■	—	■
Natrium	■	—	■
<u>Fettsäureester:</u>			
Diglyceride / Fette	—	—	■
Octylpalmitat	—	—	■
<u>Fettsäuren:</u>			
mittlere (C12 – C18)	—	□	■
höhere (C12 – C18)	□	■	■
<u>Schmiermittel:</u>			
Langkettige Kohlenwasserstoffe	—	—	■
<u>Phthalsäureester:</u>			
Phthalatkationen	■	■	■
Diocylphthalat	■	■	□
Silikon: Polydimethylsiloxan	—	—	■

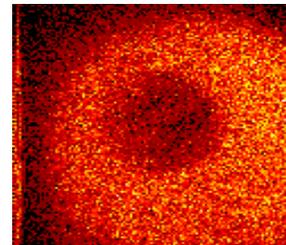
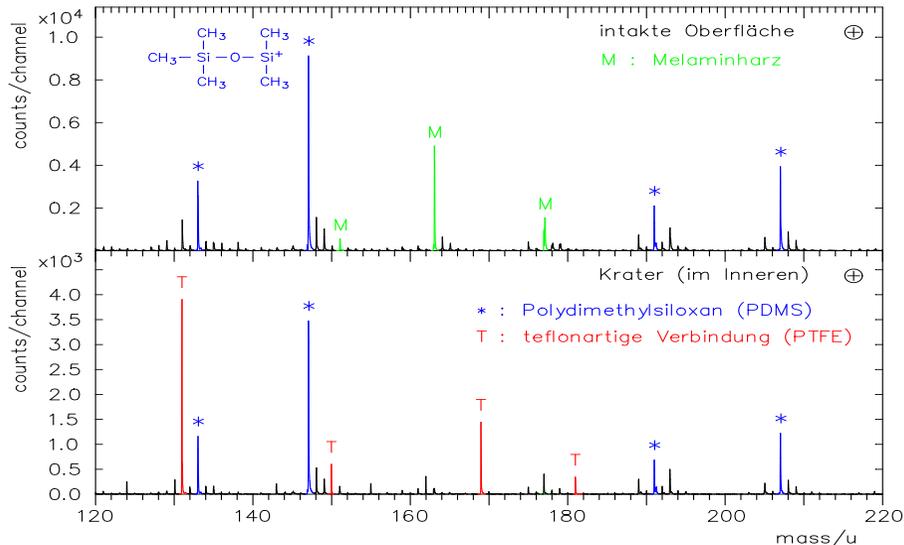
### Zeitaufgelöste Sekundärionen-Massenspektrometrie (TOF-SIMS)



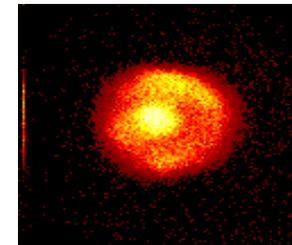
◆ Stoßfänger weisen schwarze Stippen auf



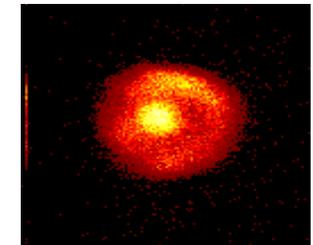
500 μm



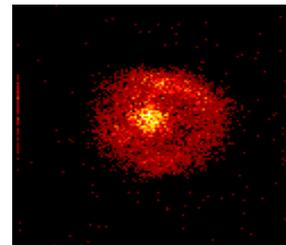
Si<sup>+</sup> (28u)



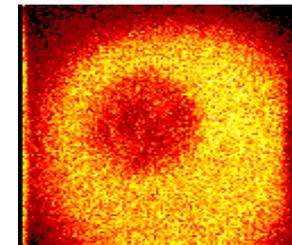
CF<sup>+</sup> (31u)



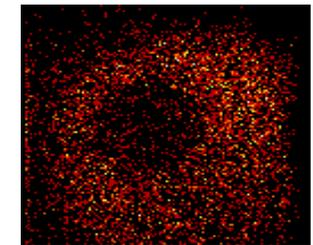
CF<sub>3</sub><sup>+</sup> (69u)



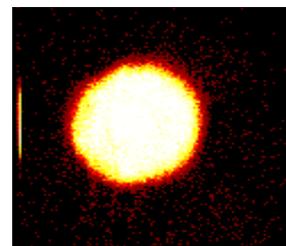
C<sub>2</sub>F<sub>4</sub><sup>+</sup> (100u)



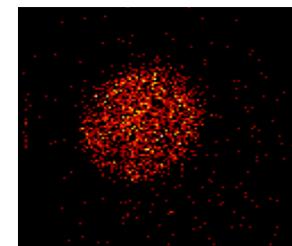
O<sup>-</sup> (16u)



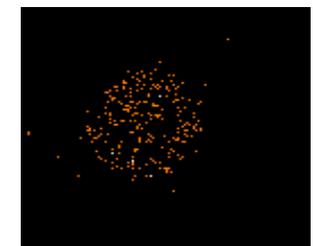
CH<sub>3</sub>SiO<sub>2</sub><sup>-</sup> (75u)



F<sup>-</sup> (19u)



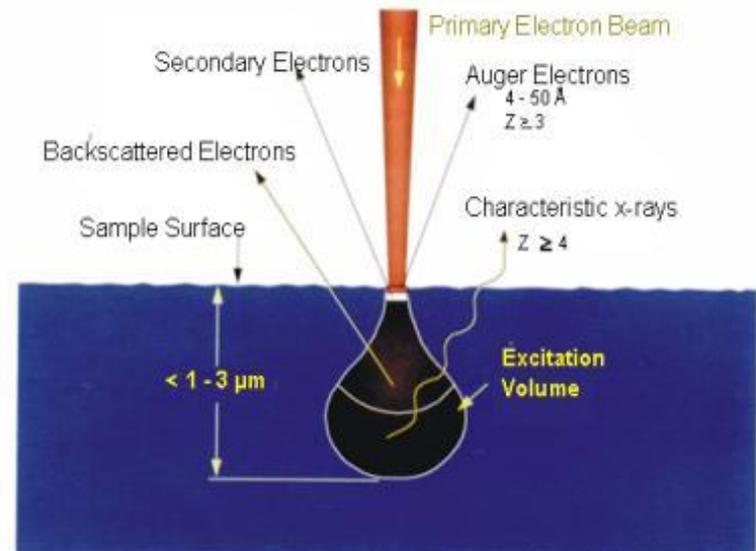
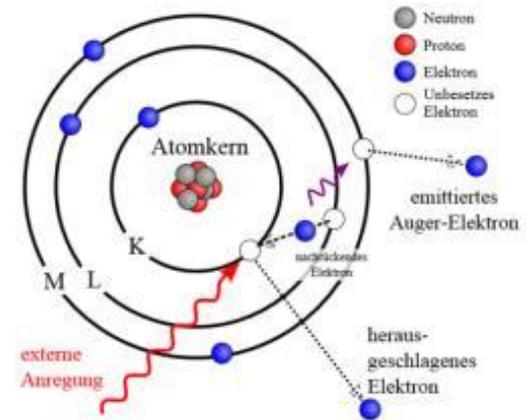
CF<sub>3</sub><sup>-</sup> (69u)



C<sub>7</sub>F<sub>11</sub><sup>-</sup> (293u)

### ■ Auger-Elektronenspektroskopie (AES)

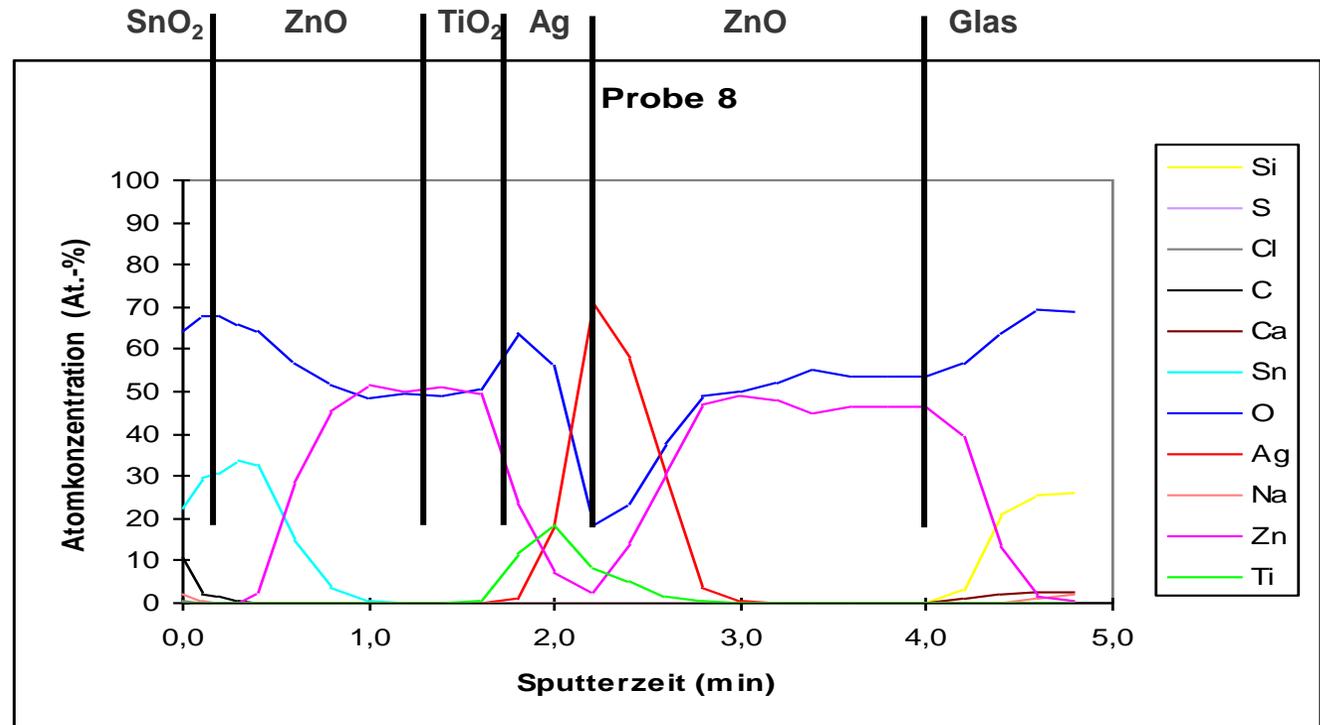
- Ein Elektron aus einer der inneren Schalen wird durch ein Primärelektron herausgelöst (Ionisation). Der frei gewordene Platz wird durch ein Elektron aus einem höheren Energieniveau wieder belegt. Die dabei frei werdende Energie wird auf ein anderes Elektron übertragen werden, das das Atom als Auger-Elektron verlässt.
- Laterale Auflösung: 30 nm
- Tiefenaufklärung: 0,5 ... 3 nm
- Nachweisgrenze: 0,1 ... 0,5 at%
- Nachweis von Elementen mit  $Z \geq 3$
- Tiefenprofile sind möglich



- Augerelektronen-Spektroskopie (AES)**

1. Zinnoxid
2. Zinkoxid
3. Titandioxid
4. Silber
5. Zinkoxid
6. Glas

Low-E Beschichtung auf Isolierglas

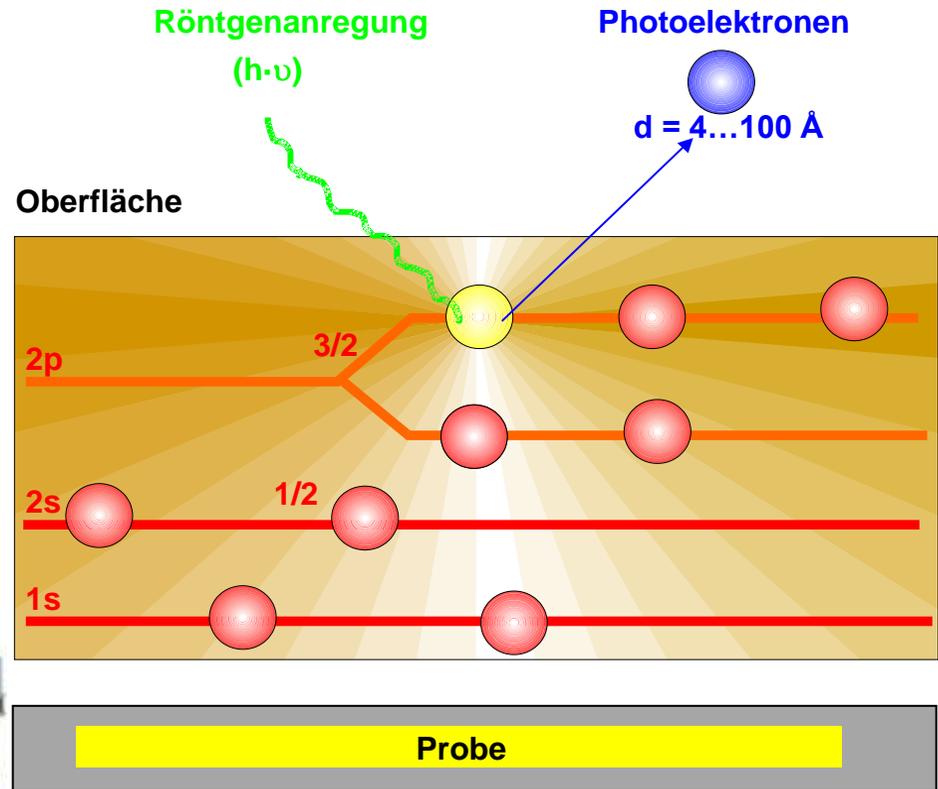


### ■ Röntgenangeregte Photoelektronenspektroskopie (XPS)

- Anregung des Festkörpers über Röntgenstrahlung und Nachweis der austretenden Photoelektronen
- Laterale Auflösung: 10  $\mu\text{m}$
- Tiefenauflösung: 0,5 ... 3 nm
- Nachweisgrenze: 0,1 at%
- Quantifizierbarkeit: gut
- Nachweis von Elementen mit  $Z \geq 3$
- Tiefenprofile sind möglich



PHI Quantum 2000



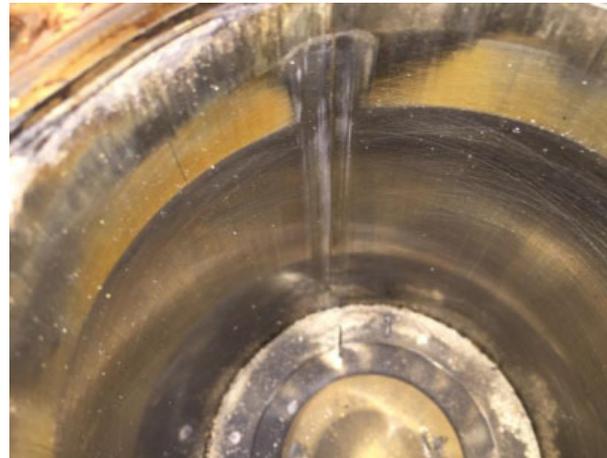
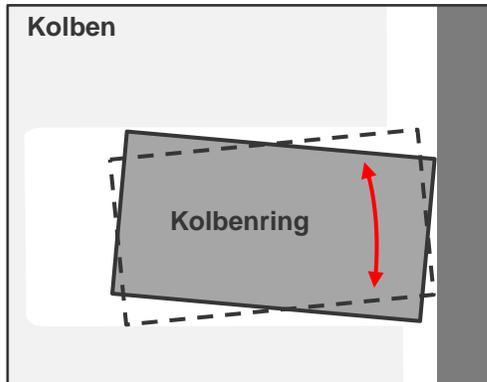
	REM / EDX	AES	XPS	TOF-SIMS
<b>Informationstiefe</b>	10 µm	0,5 nm (1 – 2 Monolagen)	0,5 nm bis zu max. 10 nm	0,5 nm
<b>Nachweisgrenze</b>	1 at%	0,1 – 0,5 at%	0,1 at%	Spurenanalytik
<b>Laterale Auflösung</b>	10 nm	30 nm	10 µm	1 µm
<b>Chemische Analyse</b>	nur Elemente	nur begrenzte Information	gut (chemische Verschiebung)	sehr gut (lange Molekülketten)
<b>Quantifizierbarkeit</b>	semiquantitativ	Sensitivitätsfaktoren (begrenzte Genauigkeit) Nachweis: $Z \geq 3$	Sensitivitätsfaktoren (relativ genau → f.p.m) Nachweis: $Z \geq 3$	semiquantitativ, nur relativer Vergleich möglich
<b>Tiefenprofile</b>	Nein	möglich	möglich, bis 10 nm auch winkelaufgelöst	möglich, aber Verlust der chemischen Information

## Motorschäden infolge von Kolbenfressern

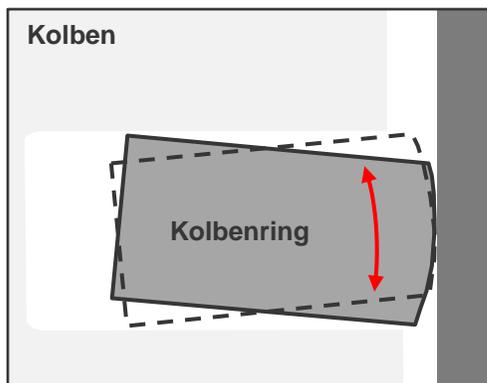
### Entstehung von Motorschäden durch Kolbenfresser infolge von gebrochenen Kolbenringen

- Ermüdungsbruch der Kolbenringe infolge falscher (zu großer) Spaltweiten der Nuten in den Kolben

#### Niedrige Laufleistung



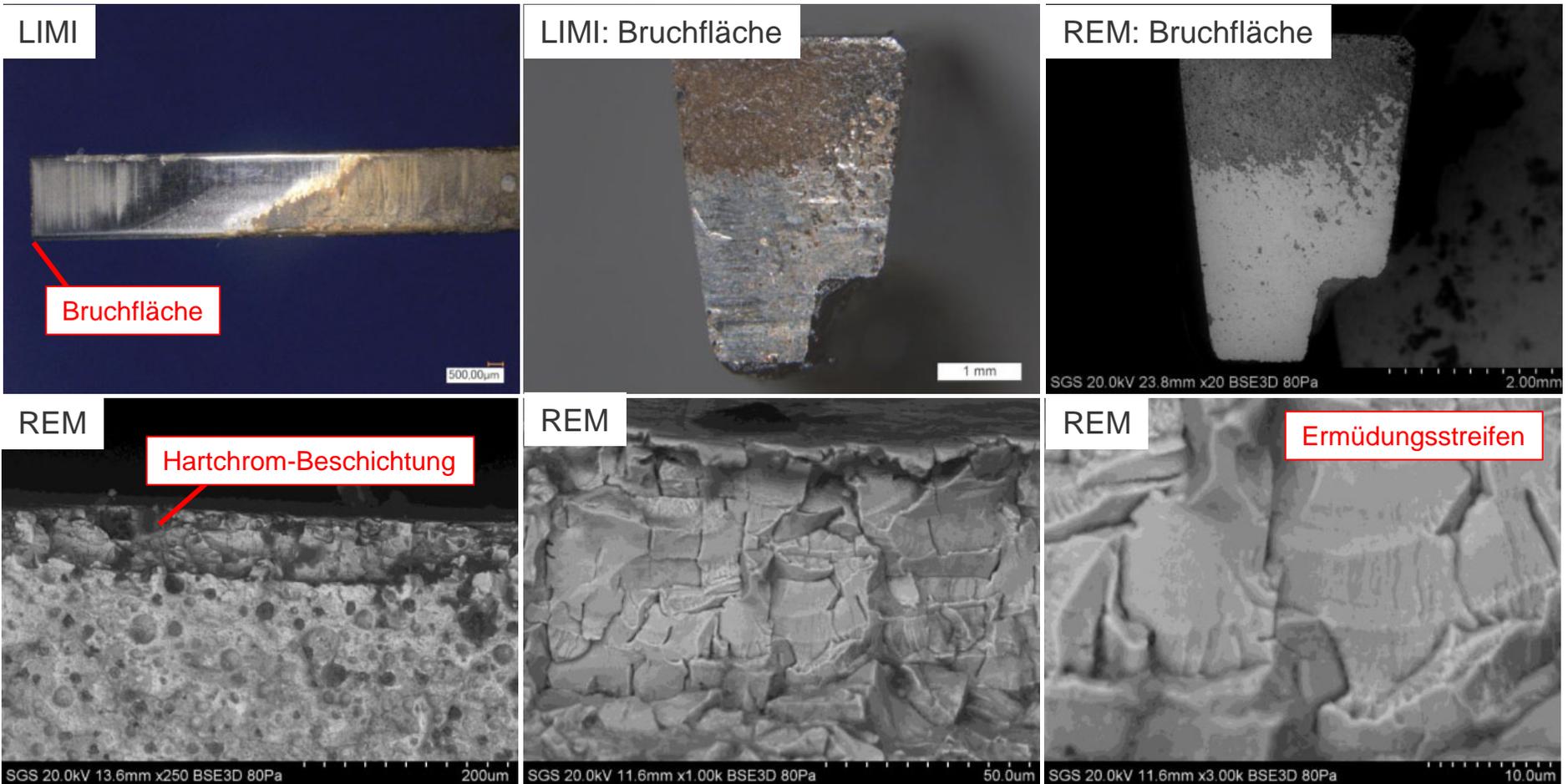
#### Hohe Laufleistung



## Motorschäden infolge von Kolbenfressern

### Entstehung von Motorschäden durch Kolbenfresser infolge von gebrochenen Kolbenringen

- Ermüdungsbruch der Kolbenringe infolge falscher (zu großer) Spaltweiten der Nuten in den Kolben



## Kolbenfresser an einem Großmotor

Kolbenfresser in einem Grossmotor zum Einsatz in Schiffen und Kraftwerken

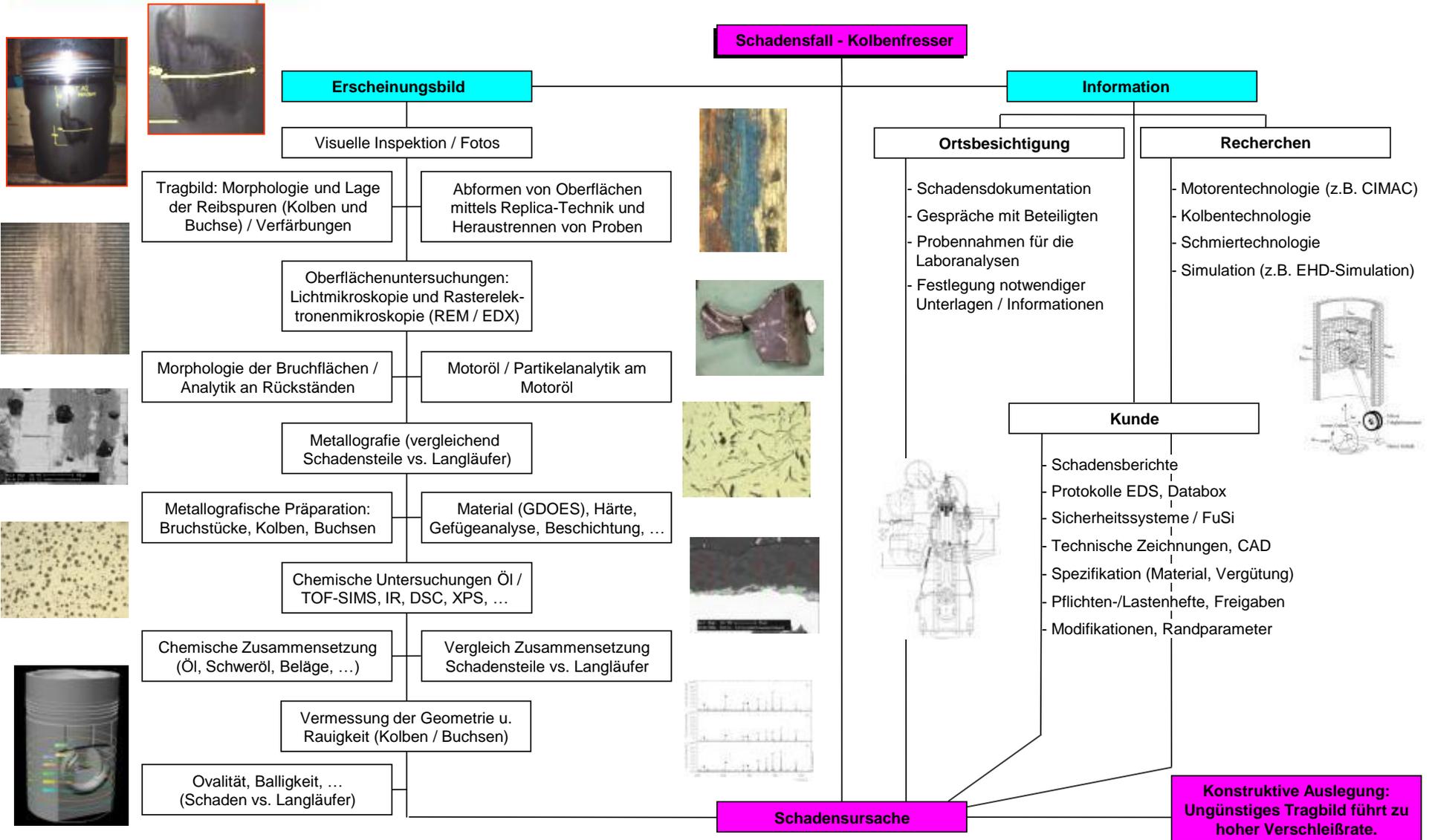
Der Kolbenfresser in einem 18-Zylinder Großmotor hat zu einer Explosion der Maschine in einem stationären Kraftwerk in Südamerika geführt.



Reibspuren in einem Kolben



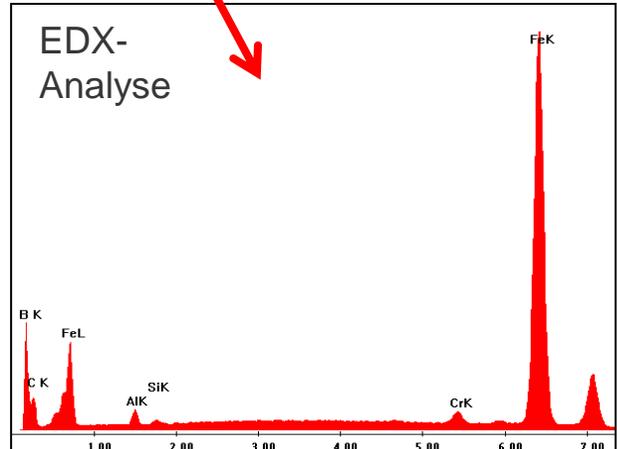
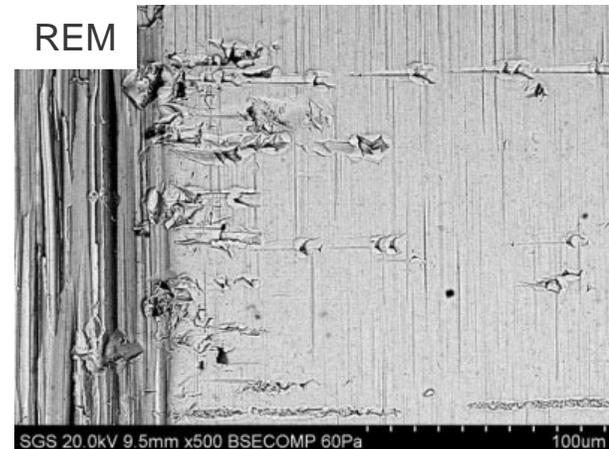
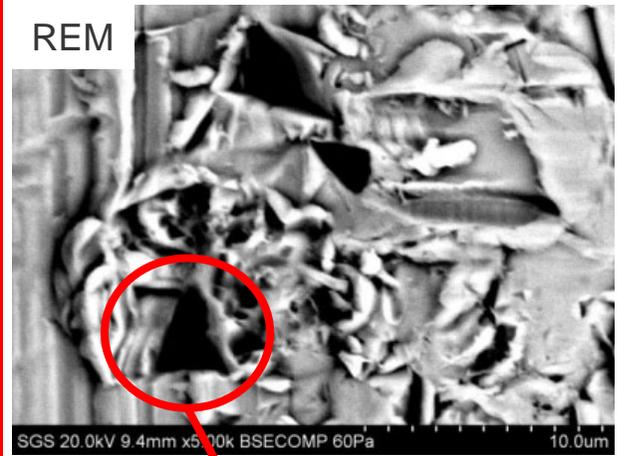
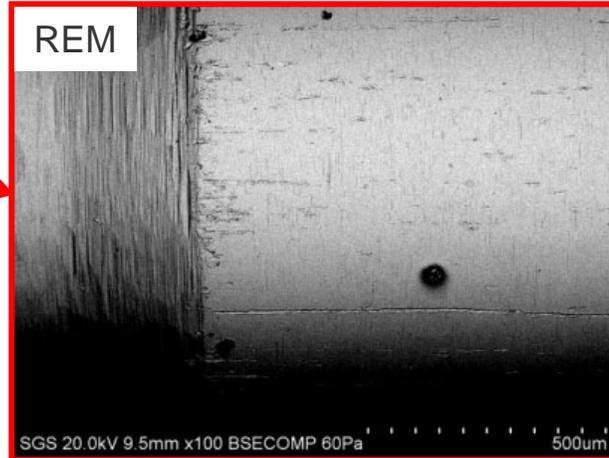
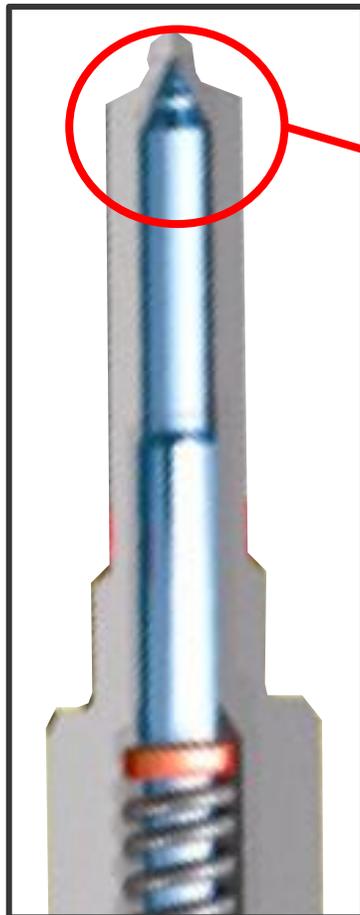
Fragmente eines Kolbens aus dem betroffenen Motor



## Verschleiß an Komponenten von CR-Injektoren

### Common Rail Dieselinjektoren

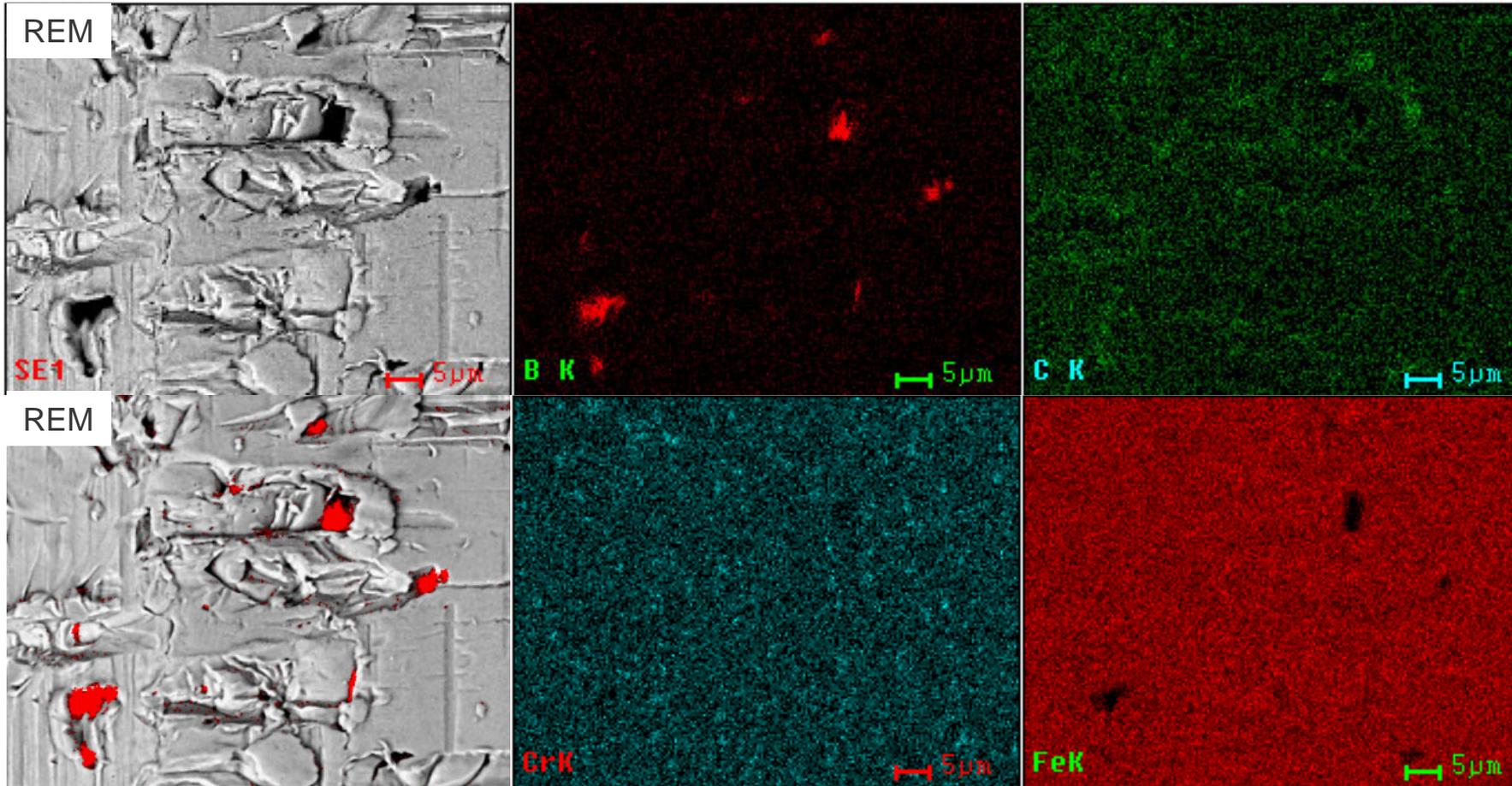
- Verschleißfurchen in Injektornadeln verursacht durch Schleifmittelreste (Borcarbide) von ca. 5µm Größe.

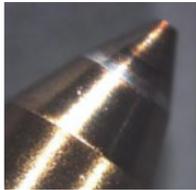


## Verschleiß an Komponenten von CR-Injektoren

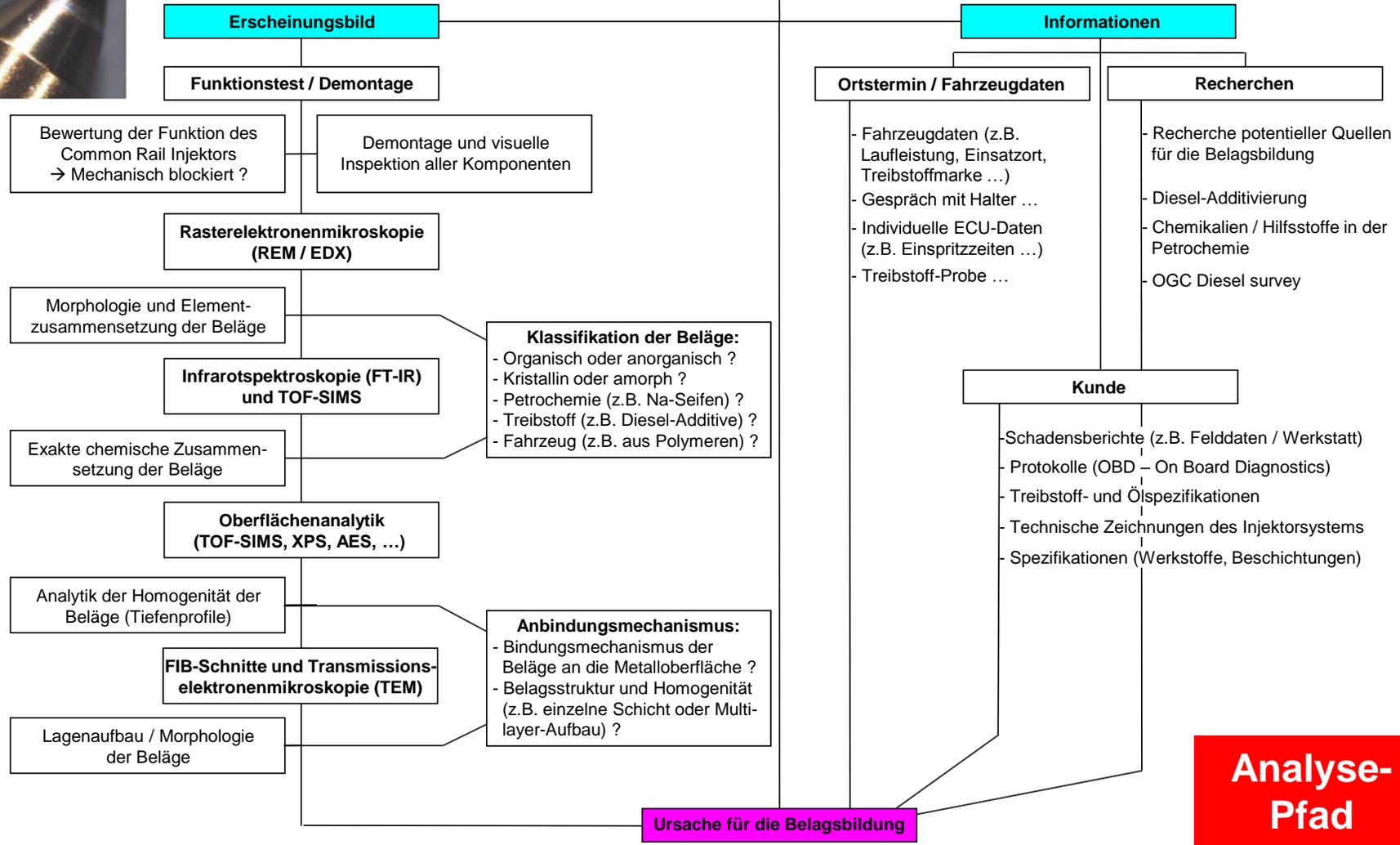
### Common Rail Dieselinjektoren

- Verschleißfurchen in Injektornadeln verursacht durch Schleifmittelreste (Borkarbid) von ca. 5µm Größe.





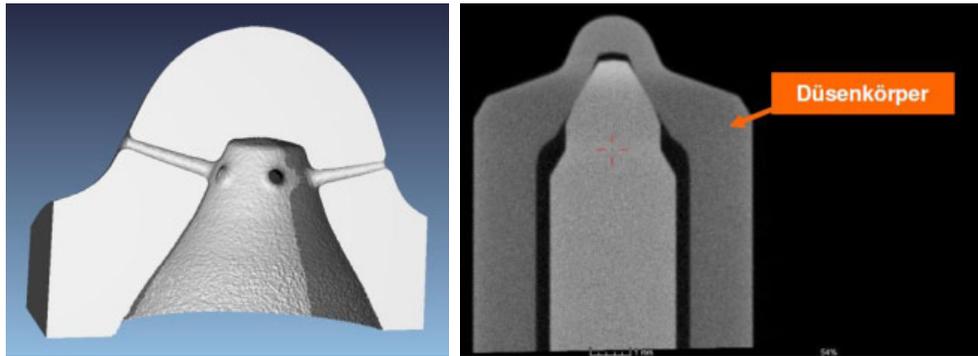
## Beläge auf CR-Injektornadeln



**Analyse-Pfad**

## Ergebnisse von Analysen zur Belagsbildung auf Komponenten von CR-Injektoren

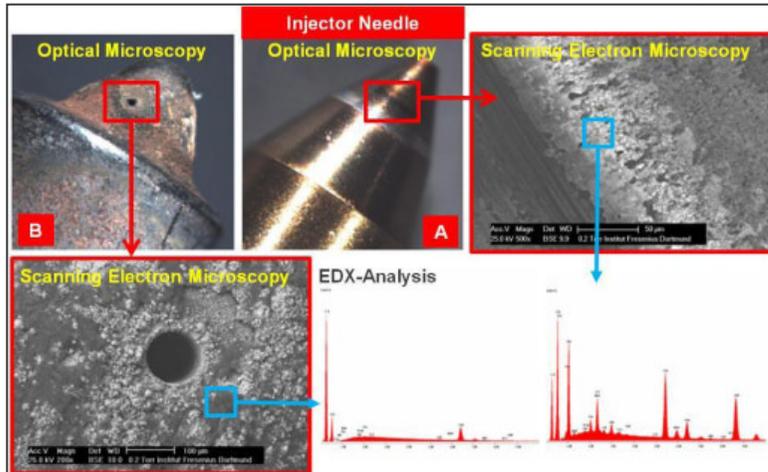
### Industrielle 3D-Computertomographie



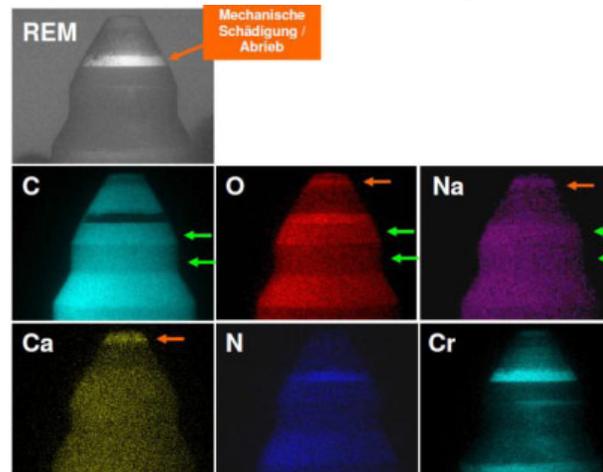
### TOF-SIMS

substance	preparation (0587)			
	2A1	2B	2A2	
<b>alkali / alkaline earth metals and compounds</b>				
calcium	■	■	■	Na-Verbindungen in allen 3 Bereichen
potassium	■	■	■	
sodium	■	■	■	
sodium hydroxide	■	■	■	
sodium carbonate	■	■	■	
sodium sulfate	■	■	■	
<b>anions (nonspecific)</b>				
CN <sup>-</sup> / CNO <sup>-</sup>	■	■	■	Formiate
SC <sup>-</sup>	■	■	■	
PO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	■	■	■	
COOH <sup>-</sup> (= formate)	■	■	■	Fettsäuren
<b>fatty acids</b>				
malonic (mostly palmitic acid)	■	■	■	
higher (mostly palmitic/oleic acid)	■	■	■	
<b>half metals</b>				
silicon	■	■	■	Silikon (PDMS)
halogens	■	■	■	
fluorine	■	■	■	
chlorine	■	■	■	
<b>metal / metal compounds</b>				
iron	■	■	■	
manganese	■	■	■	
aluminum	■	■	■	
poly(dimethyl siloxane)	■	■	■	
<b>other compounds</b>				
alkyl sulfates	■	■	■	Alkylsulfate
nitrogen	■	■	■	

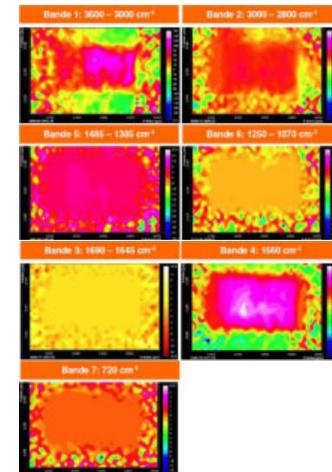
### Licht- und Rasterelektronenmikroskopie



### Element Mapping



### Infrarotspektroskopie



## Schäden an Pendelrollenlagern

Ein Pendelrollenlager zeigt massive Reibspuren und Schädigungen an den Laufflächen.

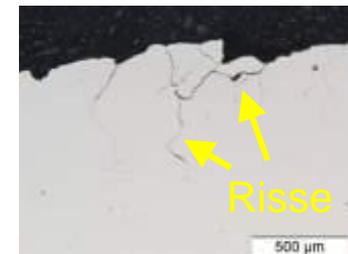
Die Ursache für die Schädigung ist aufzuklären.



**Untersuchungsergebnis:**  
Die Schälung und die Rissbildung in den geschädigten Bereichen belegt, dass eine Ermüdung des Materials die Ausfallursache war (z.B. mangelnde Schmierung, ungeeignete Lastverteilung).

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
0,943	0,230	0,377	0,017	0,009	1,447	0,063
<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>	<b>W</b>
0,015	0,006	0,074	0,001	0,002	0,014	0,007
<b>N</b>	<b>Ta</b>	<b>Pb</b>	<b>Co</b>	<b>Zr</b>		
0,0078	0,005	0,001	0,008	0,002		

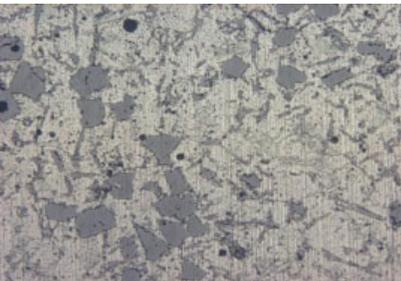
Werkstoffanalyse: 100Cr6 (1.3505)





## Analyse von Schmierstoff-Additiven auf Oberflächen

- Einteilung von Schmierstoffadditiven nach ihrer Funktion (Auswahl)



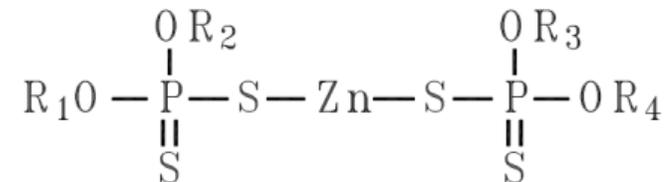
### Additive verändern Eigenschaften von Schmierstoffen

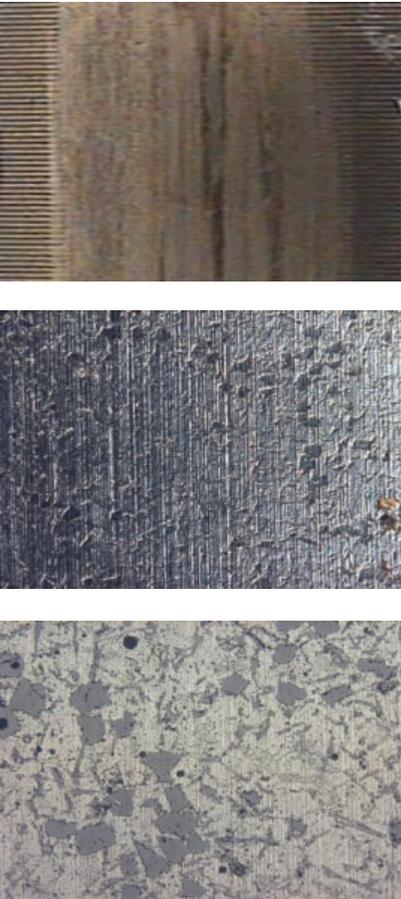
Physikalisch	Chemisch	Reiboberflächen
<b>Viskositätsindex</b> Verbessern des Viskositäts-Temperatur Verhaltens	<b>Detergenzien</b> Die Entstehung von Ablagerungen bei hohen Temperaturen wird gemindert	<b>Korrosionsinhibitoren</b> Die Bildung von Korrosion an metallischen Oberflächen wird verhindert
<b>Anti-Schaum-Additive</b> Die Oberflächenbespannung wird beeinflusst	<b>Dispergatoren</b> Die Entstehung von Schlammablagerung bei niedrigen Temperaturen wird gemindert	<b>Anti-Wear-Additive (AW)</b> Abrasiver Verschleiß bei mäßigen Bedingungen wird verhindert
<b>Stockpunkterniedriger</b> Das Ausfällen von Paraffin-Kristallen bei tiefen Temperaturen wird behindert	<b>Oxidationsinhibitoren</b> Die Oxidation des Grundöls wird verzögert / verringert	<b>Extreme-Pressure-Additive (EP)</b> Mikroverschweißung (Fretting) bei hoher Belastung wird reduziert



## Analyse von Schmierstoff-Additiven auf Oberflächen

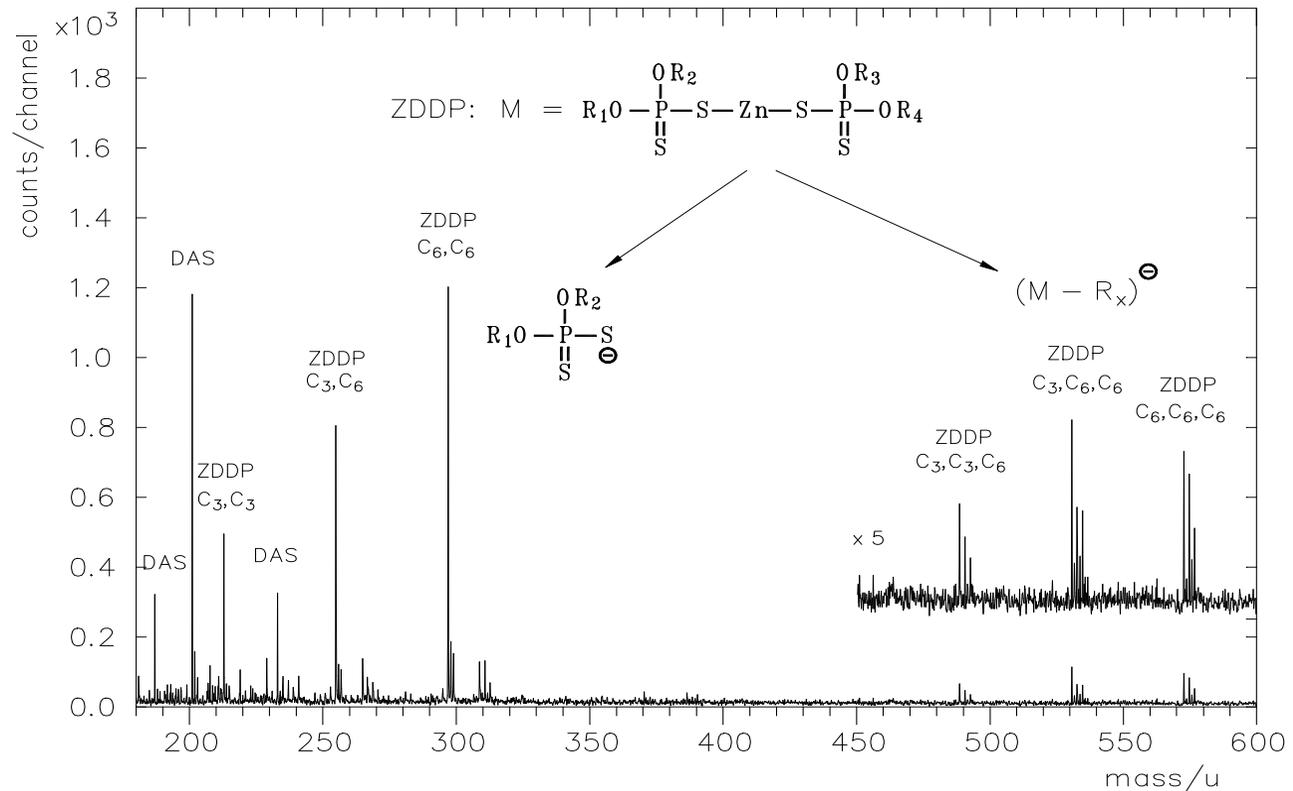
- Zinddialkyldithiophosphate (ZDDP) als Verschleiß- und Alterungsschutz
- ZPPP gehört zur Gruppe der Extreme-Pressure-Additiven (EP) und verbessert die tribologischen Eigenschaften des Schmierstoffs
- Bildung von Metallsulfiden aus ZDDP unter höherer mechanischer Belastung verhindert Mikroverschweißen (Adhäsion / Fretting) zwischen den Metalloberflächen
- Transformation angelagerter ZDDP-Moleküle zu einer Phosphatglaschutzschicht bewirkt Korrosions- und Verschleißschutz
- Über den Einsatz der TOF-SIMS Analytik kann das Vorhandensein von ZPPD auf metallischen Oberflächen und die Reaktionsprodukte nachgewiesen werden





## Analyse von Schmierstoff-Additiven auf Oberflächen

- Zinddialkyldithiophosphate (ZDDP) als Verschleiß- und Alterungsschutz





### Verteilung von Schmierstoff-Additiven auf Oberflächen

#### ■ Antioxidantien

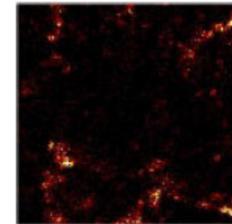
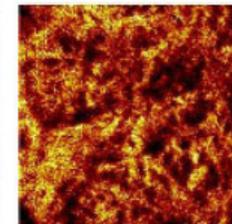
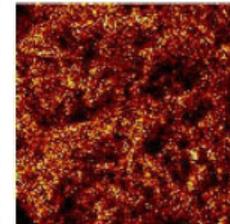
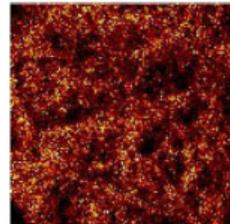
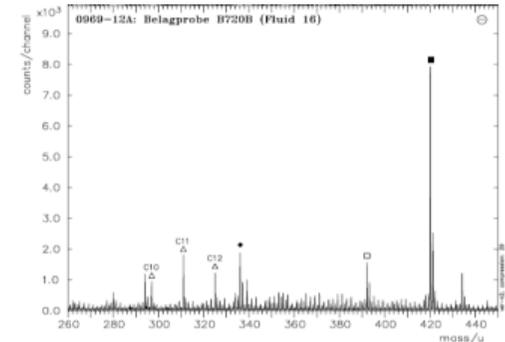
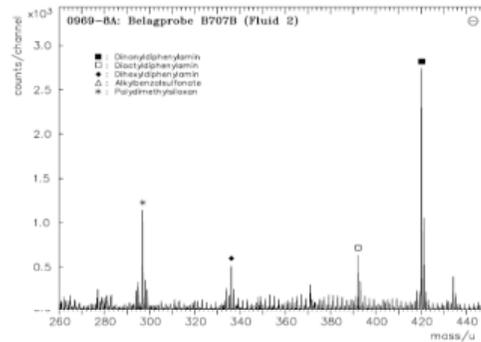
- DHDPA
- DODPA
- DNDPA

#### ■ Korrosionsschutz

- TT
- ABS

#### ■ Entschäumer

- PDMS

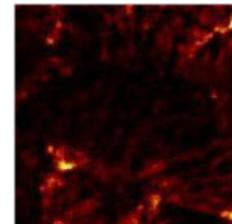
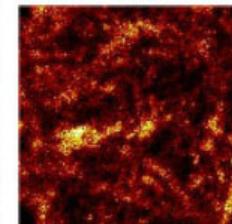
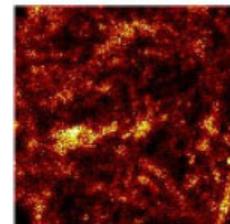
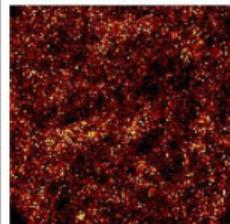


DHDPA mc:12 tc:4.8e4

DODPA mc:13 tc:5.6e4

DNDPA mc:40 tc:2.3e5

FePO<sub>x</sub> mc:13 tc:8.8e3



TT mc:8 tc:2.4e4

ABS mc:12 tc:5.0e4

PDMS mc:18 tc:8.8e4

PO<sub>4</sub> mc:202 tc:2.9e5

Abk.	Verbindung	Masse
MA	Verb. auf Basis Methacrylsäure/Methacrylat	-85 u
DHDPA	Dihexyldiphenylamin	-336 u
DODPA	Diocetyldiphenylamin	-392 u
DNDPA	Dinonyldiphenylamin	-420 u
TT	Tolyltriazol	-132 u
PDMS	Polydimethylsiloxan	-223 u
FePO <sub>x</sub>	Eisenphosphate	-215 u
ABS	Alkylbenzolsulfonate	-183 u

### CONTACT TO US

**MANY THANKS FOR  
YOUR ATTENTION!**

SGS IS THE WORLD'S LEADING  
INSPECTION, VERIFICATION, TESTING  
AND CERTIFICATION COMPANY.

**Dr. Olaf Günnewig**  
Business Development Manager Transportation

SGS INSTITUT FRESENIUS GmbH  
Joseph-von-Fraunhofer-Str.13  
44227 Dortmund | GERMANY

t +49 231 97427303

m +49 172 4013319

[olaf.guennewig@sgs.com](mailto:olaf.guennewig@sgs.com)

[www.sgs.com](http://www.sgs.com)

[WWW.SGS.COM](http://WWW.SGS.COM)  
[WWW.SGSGROUP.DE](http://WWW.SGSGROUP.DE)

WHEN YOU NEED TO BE SURE

