
Verschleißphänomene moderner Verbrennungsmotoren und Möglichkeiten der Untersuchung

Prof. Dr.-Ing. **J. Hadler**, Volkswagen AG

Dr.-Ing. **S. Engel**, Volkswagen AG

Agenda

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

▶ Grundlagen zum Verschleiß

- ▶ Verschleißbegriff
- ▶ Verschleißmechanismen

▶ Radionuklidtechnik (RNT)

- ▶ Vorteile der RNT
- ▶ Mögliche Bauteiluntersuchungen
- ▶ Messverfahren

▶ Praxisbeispiele

- ▶ Verschleiß nach unterschiedlichen Einlaufprogrammen
- ▶ Verschleiß bei Start-Stopp
- ▶ Verschleiß ZKG/KR = f (Motoröl, Kolbenringbeschichtung)

▶ Zusammenfassung

Grundlagen zum Verschleiß

Verschleiß

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

DIN 50320

„**Verschleiß** ist der fortschreitende Materialverlust eines festen Körpers (Grundkörper) hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.“

Fleischer

“**Verschleiß**: Infolge Reibung eintretende bleibende Form-, Größen- und/oder Stoffänderung der die Oberfläche von Festkörpern bildenden Stoffbereiche.“



Verschleißmechanismen

- Als **Verschleißmechanismen** bezeichnet man die im Kontaktbereich eines tribologischen Systems auftretenden physikalischen und chemischen Elementarprozesse, die zu Stoff- und Formänderungen an den Kontaktpartnern führen.

Verschleißbegriff

Verschleißmechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteiluntersuchungen

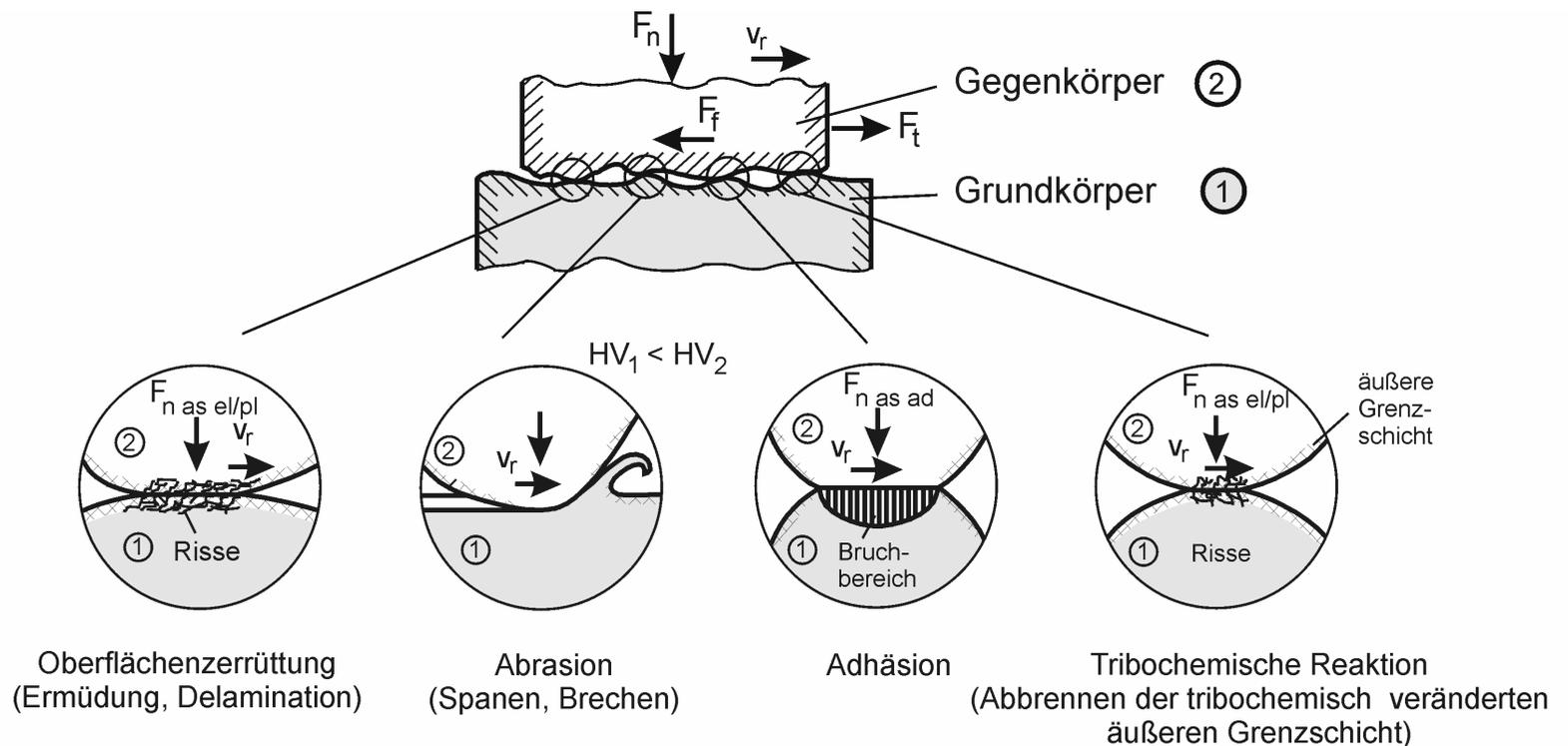
Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung



Oberflächenzerrüttung

Verschleißbegriff

**Verschleiß-
mechanismen**

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

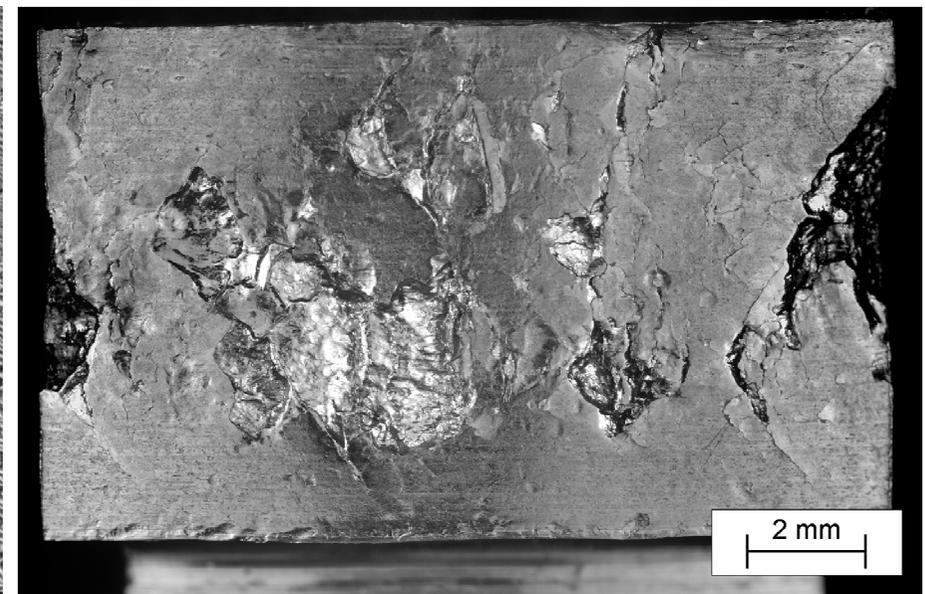
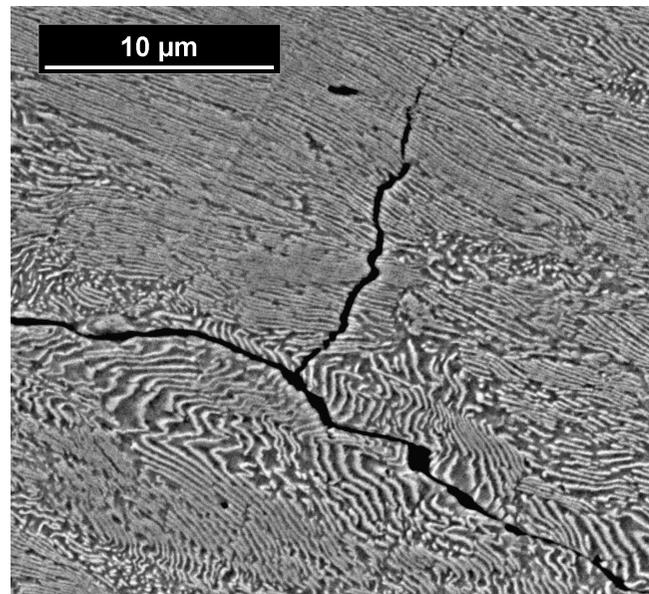
Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

- ▶ Die **Oberflächenzerrüttung** äußert sich durch Rissbildung, Risswachstum und Abtrennung von Verschleißpartikeln, hervorgerufen durch wechselnde Beanspruchungen in den oberflächennahen Bereichen von Grund- und Gegenkörper.
- ▶ **Verschleißerscheinungsformen:** Risse, Grübchen,...



Abrasion

Verschleißbegriff

**Verschleiß-
mechanismen**

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

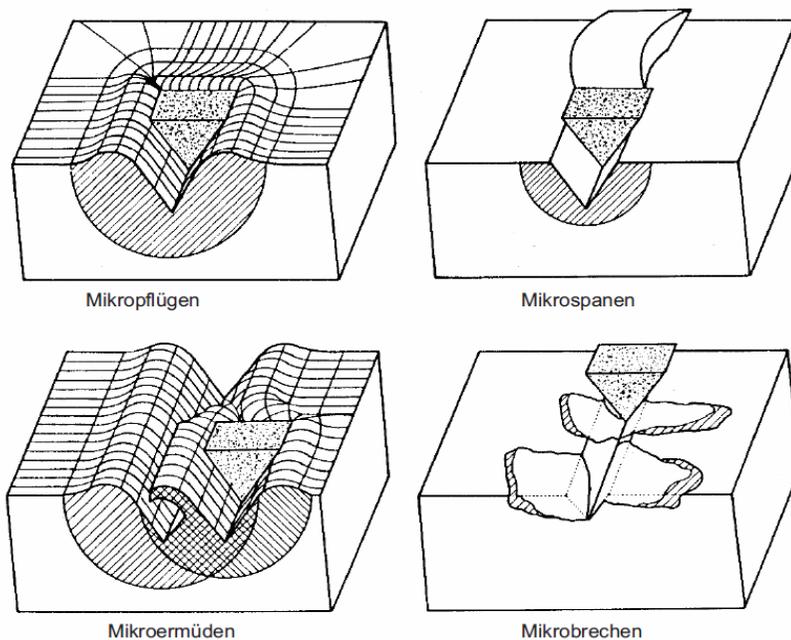
Einlauf

Start-Stopp

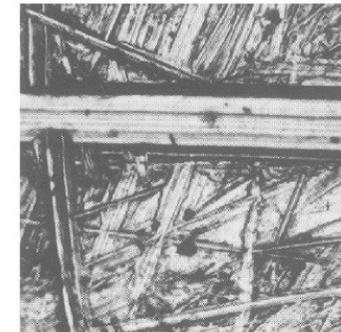
ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

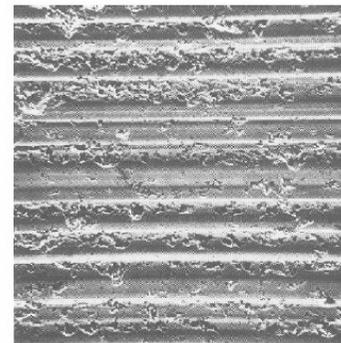
- ▶ Bei der **Abrasion** führen Ritzungen und Mikrozerspanungen des Grundkörpers durch harte Rauheitshügel des Gegenkörpers oder harte Partikel im Zwischenstoff zu Verschleiß.
- ▶ Verschleißerscheinungsformen: Kratzer, Riefen,...



Quelle: Czichos, Habig



b) LM
40 µm



f) REM
30 µm

Quelle: Gold

Adhäsion

Verschleißbegriff

**Verschleiß-
mechanismen**

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

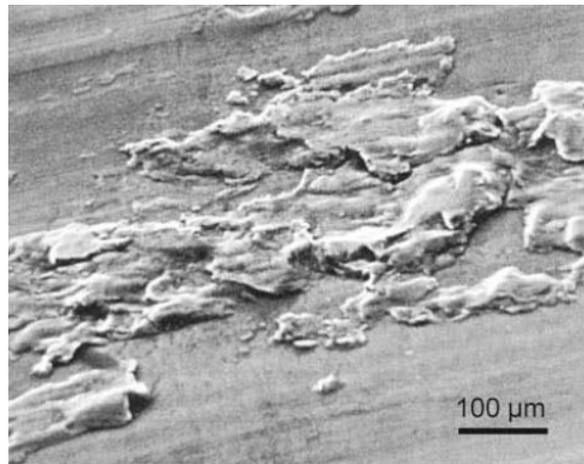
Einlauf

Start-Stopp

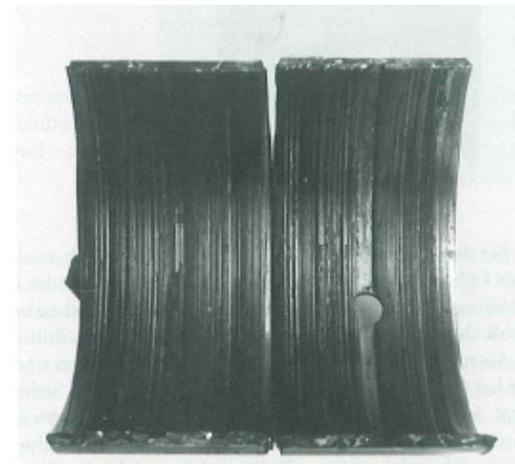
ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

- ▶ Bei der **Adhäsion** werden nach Durchbrechen vorhandener Deckschichten atomare Bindungen (Mikroverschweißungen) vor allem an den plastisch deformierten Mikrokontakten zwischen Grund- und Gegenkörper gebildet. Ist die Festigkeit der Bindungen höher als die des weicheren Reibpartners, kommt es zu Ausbrüchen aus letzterem und zum Materialübertrag auf den härteren Reibpartner.
- ▶ Verschleißerscheinungsformen: Fresser, Schuppen, Materialübertrag...



Quelle: Czichos, Habig



Quelle: Greuter, Zima, Hoffmann



Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatemanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung



Tribochemische Reaktion

Verschleißbegriff

**Verschleiß-
mechanismen**

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

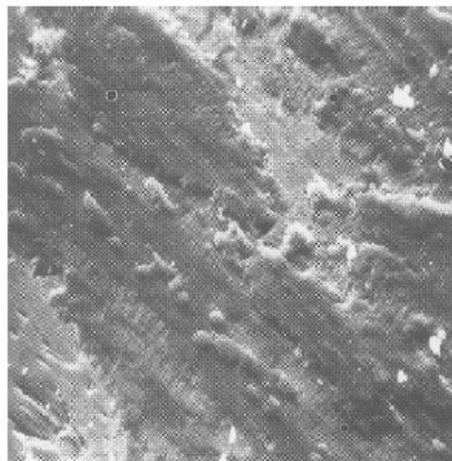
Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

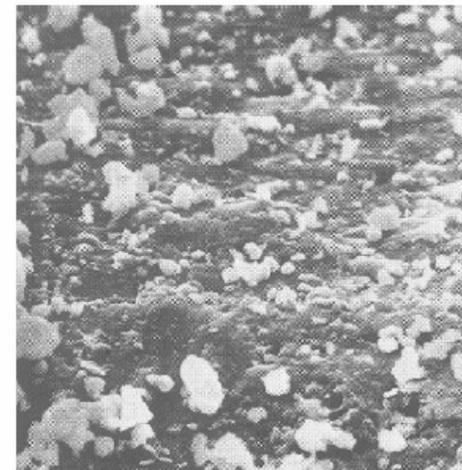
Zusammenfassung

- ▶ Bei **tribochemischen Reaktionen** finden, infolge einer reibbedingten Aktivierung der beanspruchten oberflächennahen Bereiche, chemische Reaktionen von Bestandteilen des Grund und/oder Gegenkörpers mit Bestandteilen des Zwischenstoffes (z.B. Schmierstoff) oder des Umgebungsmediums statt.
- ▶ Verschleißerscheinungsformen: Reaktionsprodukte (Schichten, Partikel),...



d) REM
15 µm

Quelle: Gold



e) REM
10 µm

Quelle: Gold

Radionuklidtechnik (RNT)



Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatemanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung



Vorteile der RNT

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

- ▶ Onlinemessung bei allen Betriebszuständen des laufenden Motors/Getriebes (auch dynamisch)
- ▶ keine Beeinträchtigung des Motors/Getriebes durch die Messmethode
- ▶ hohe Empfindlichkeit bei der Auflösung des Verschleißes (bis zu: 0,1 nm/h)
- ▶ zwei Bauteile oder Reibpartner können untersucht werden
- ▶ sichtbares Bauteileinlaufverhalten
- ▶ auch große Bauteile aktivierbar (Zylinderlaufbahn im ZKG)

Mögliche Bauteiluntersuchungen

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

**Mögliche Bauteil-
untersuchungen**

Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

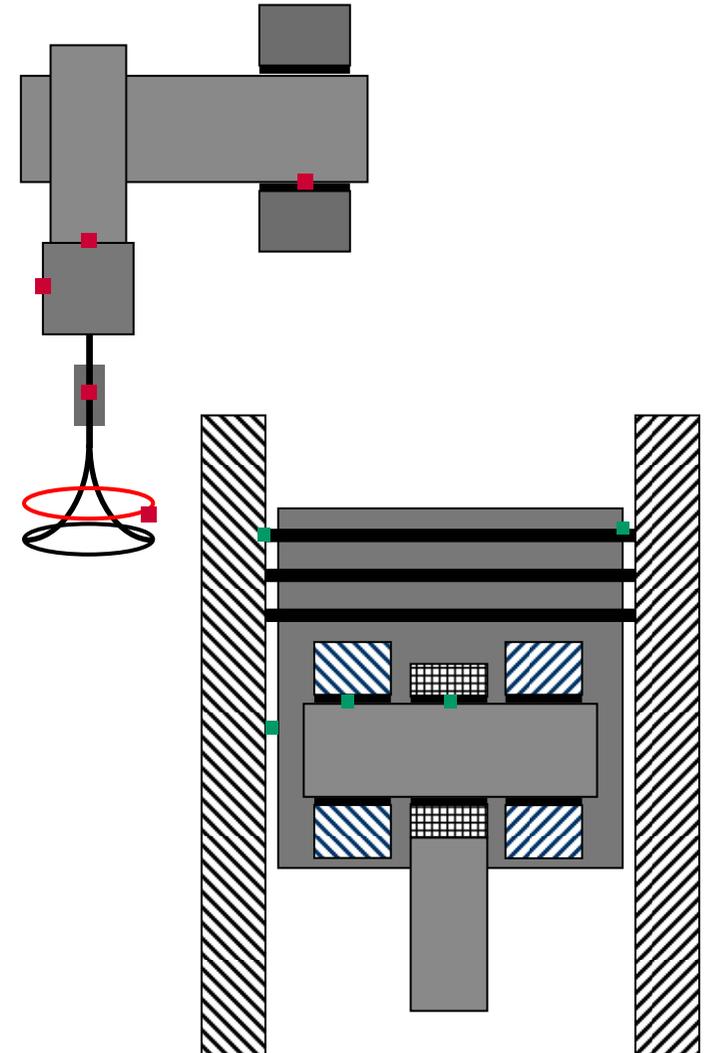
Zusammenfassung

Zylinderkopf

- ▶ Nockenwellenlager-Nockenwelle
- ▶ Nocken-Stößel
- ▶ Stößelschaft-Zylinderkopf
- ▶ Ventilschaft-Ventilführung
- ▶ Ventil-Ventilsitzring

Kolben-Zylinder

- ▶ Kolbenring-Zylinderwand
- ▶ Kolbenringflanke-Kolbenringnut
- ▶ Kolbenhemd-Zylinderwand
- ▶ Kolbenbolzen-Kolben-Pleuelauge



Mögliche Bauteiluntersuchungen

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

**Mögliche Bauteil-
untersuchungen**

Messverfahren

Einlauf

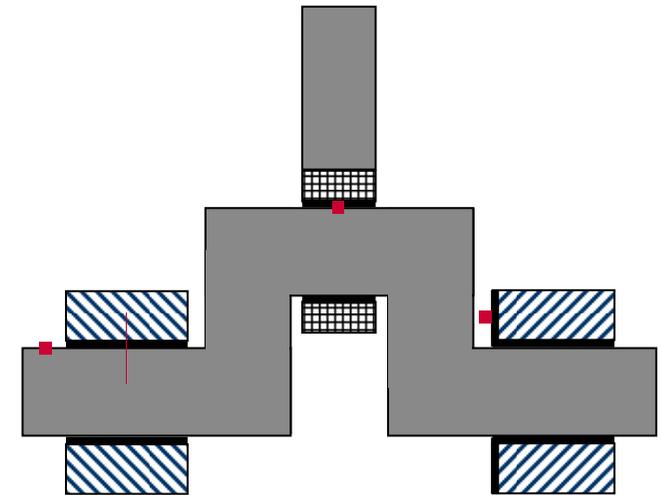
Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

Kurbelwelle-Lager

- ▶ Pleuellagerschalen-Kurbelwelle
- ▶ Hauptlagerschalen-Kurbelwelle
- ▶ Axiallager-Kurbelwelle
- ▶ Radialwellendichtring-Kurbelwelle

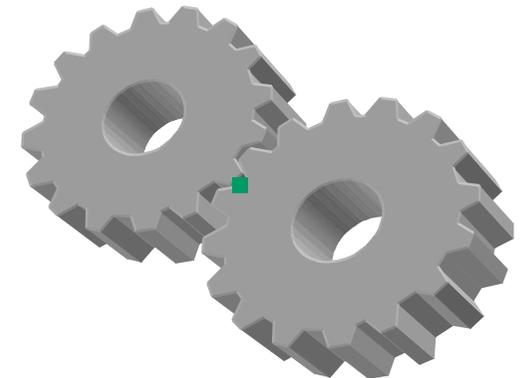


Nebenwelle/Ausgleichswellen

- ▶ Nebenwelle-Nebenwellenlager

Kraftübertragungen

- ▶ Zahnräder gegeneinander
- ▶ Kettenglieder-Kettenräder



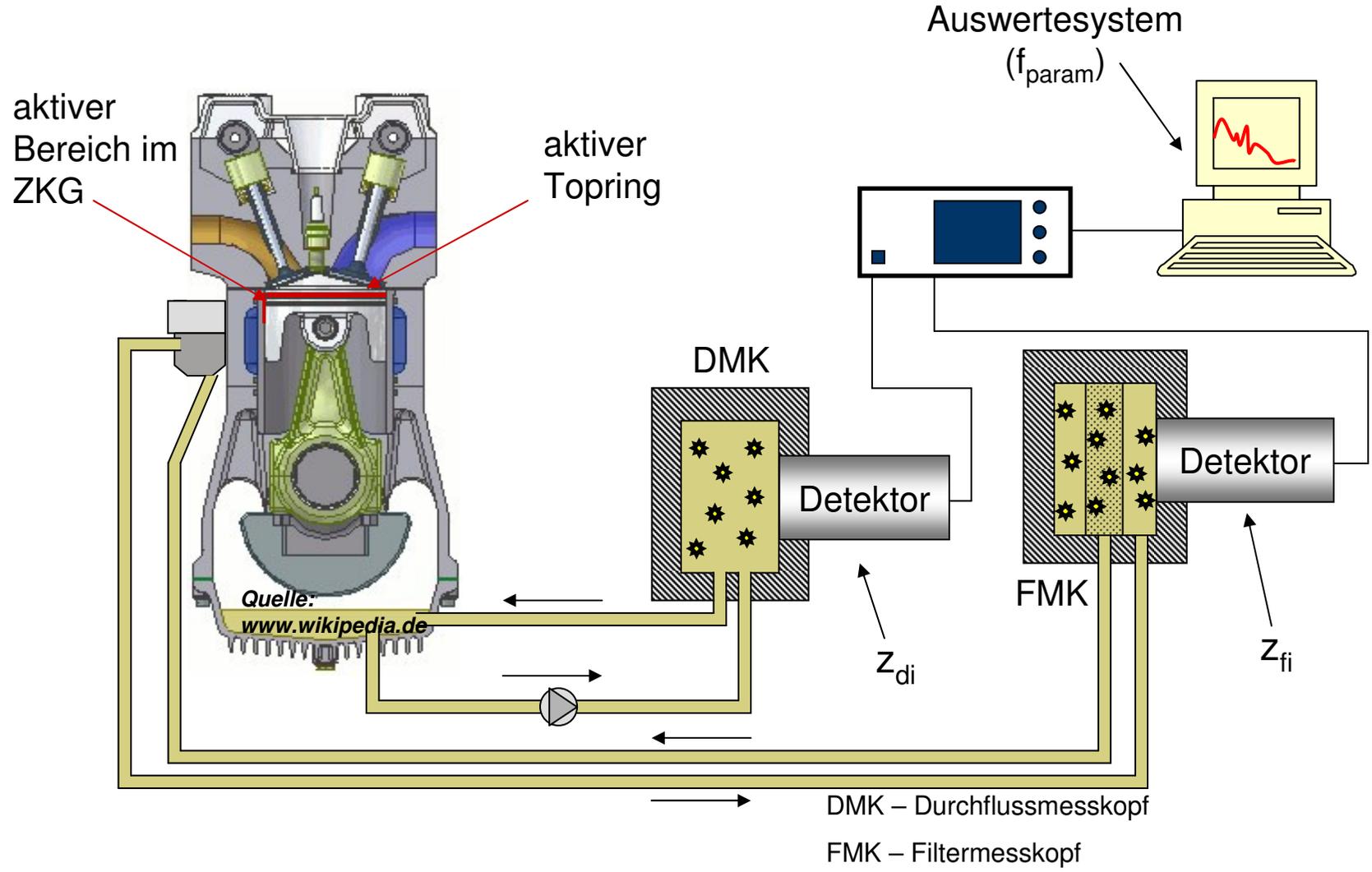
Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatemanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung

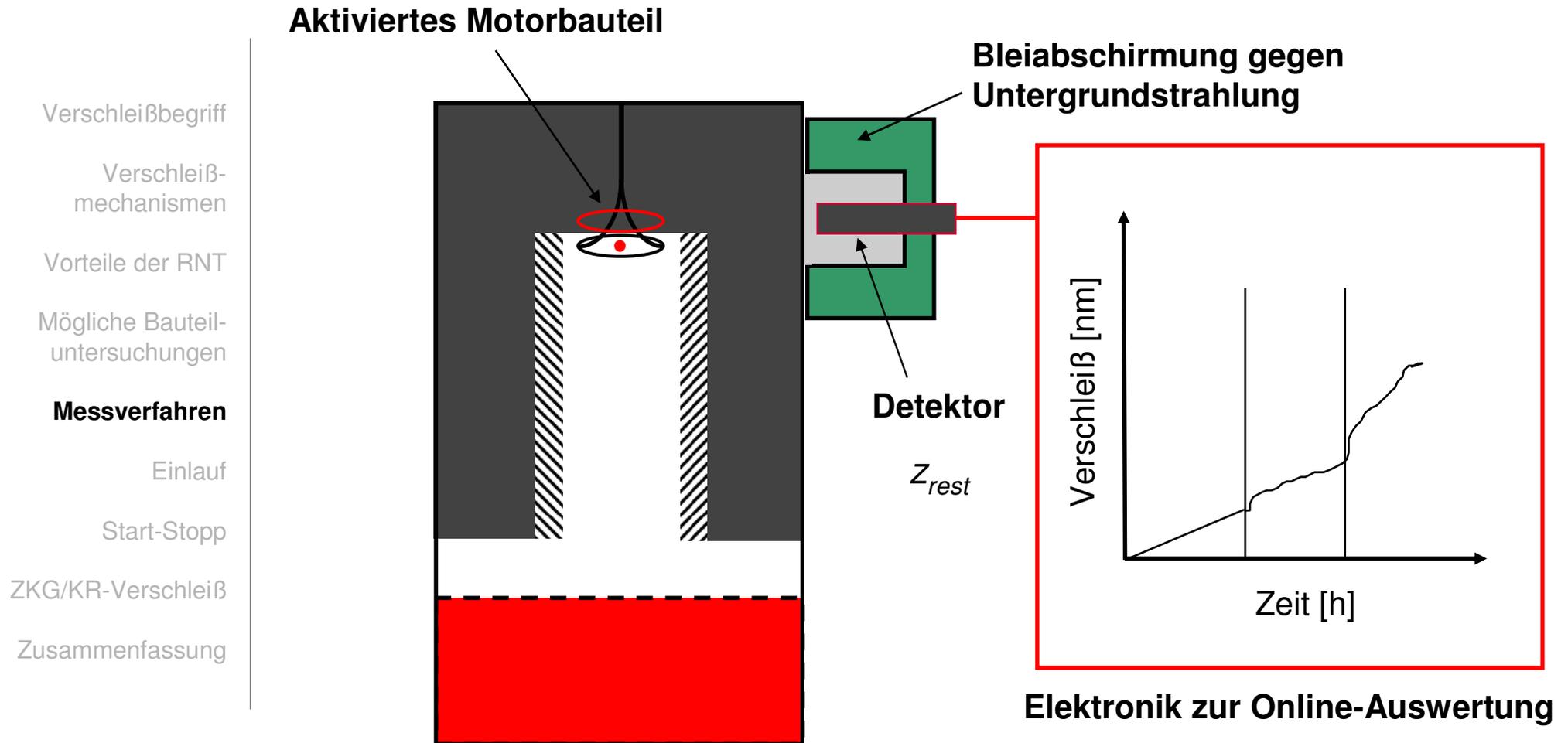


Konzentrationsmessverfahren

- Verschleißbegriff
- Verschleißmechanismen
- Vorteile der RNT
- Mögliche Bauteiluntersuchungen
- Messverfahren**
- Einlauf
- Start-Stopp
- ZKG/KR-Verschleiß
- Zusammenfassung



Dünnschichtdifferenzmessverfahren



Praxisbeispiele

Tribologisch interessante Themen

- ▶ neue Technologie- und Werkstoff-Konzepte
- ▶ Start-Stopp-Verschleiß
- ▶ Einfluss alternativer Kraftstoffe (z.B. LPG, CNG, E85,...)
- ▶ Verschleiß bei „Ölvariation“ (z.B. unterschiedliche Motorenöle und/oder Viskositäten, Untersuchungen mit Altöl, Mindestöldruckbestimmung,...)
- ▶ Auswirkungen von Applikationsmaßnahmen auf das tribologische System (z.B. Leistungssteigerung)
- ▶ ...

Verschleiß nach unterschiedlichen Einlaufprogrammen

1,6l CR-Dieselmotor

Untersuchung ZKG/KR-Verschleiß am 1,6l CR-Motor von Volkswagen

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

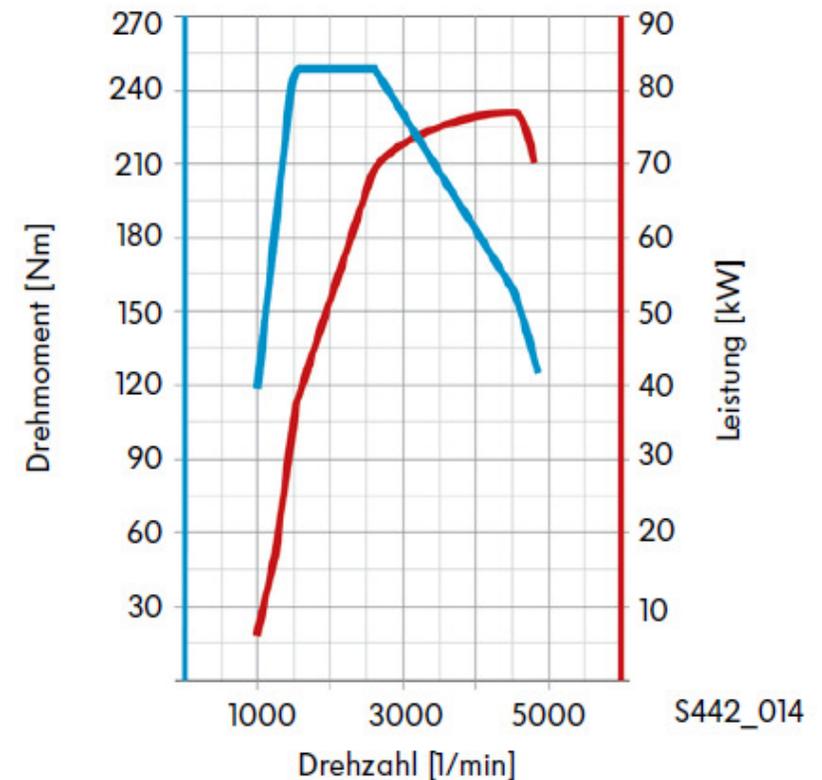
Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung



Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatemanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung



Programmablauf

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

- ▶ Einlauf
- ▶ Feineinlauf
- ▶ Dynamische Programme
- ▶ Kennfelduntersuchungen
- ▶ Öltemperaturvariation

Ziel:

Minimaler Verschleiß und minimale Reibung bereits nach kurzer Laufzeit bei maximaler Lebensdauer



Anmerkungen zum Thema Einlauf

Einflussparameter:

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

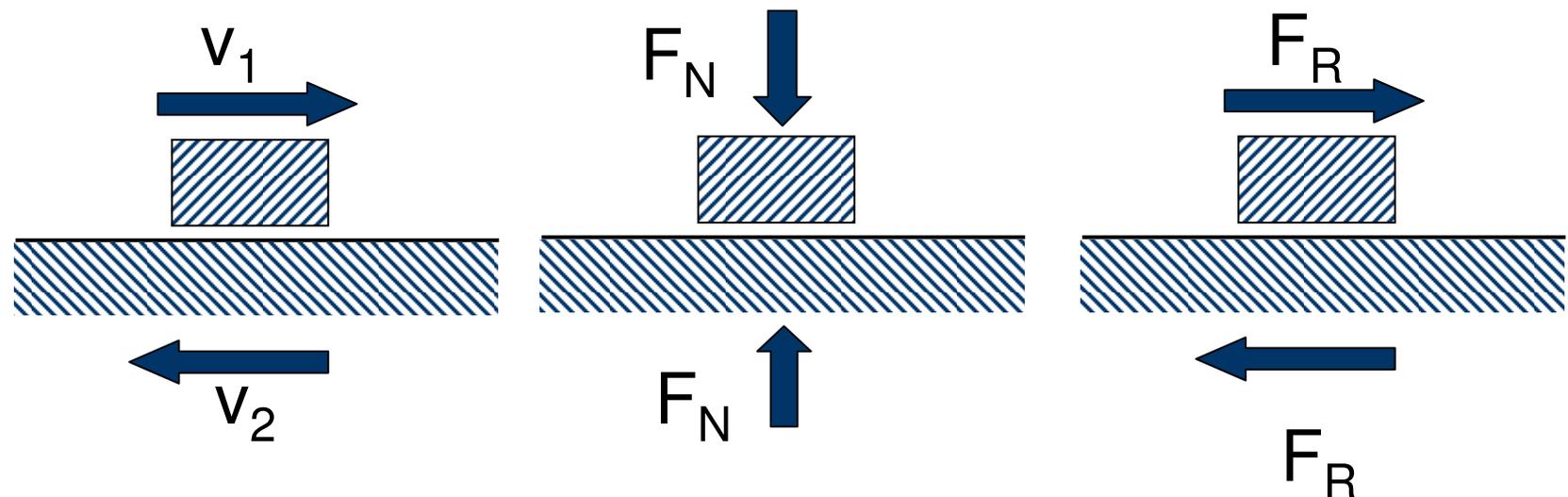
Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

- ▶ Geschwindigkeiten v im Kontakt
- ▶ Normalkräfte F_N des Kontaktes
- ▶ Reibkräfte F_R im Kontakt
- ▶ Zeit



Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatemanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung



Unterschiedliche Einlaufprogramme

Optimierter Einlauf

synthetischer Kunde

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

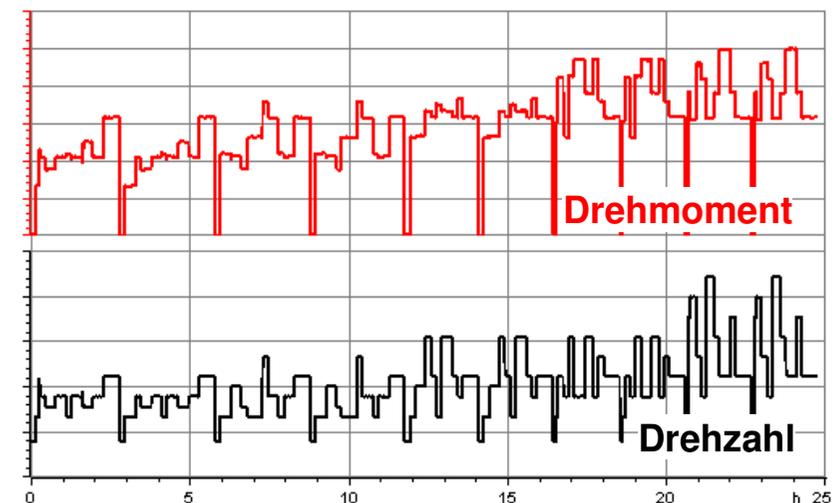
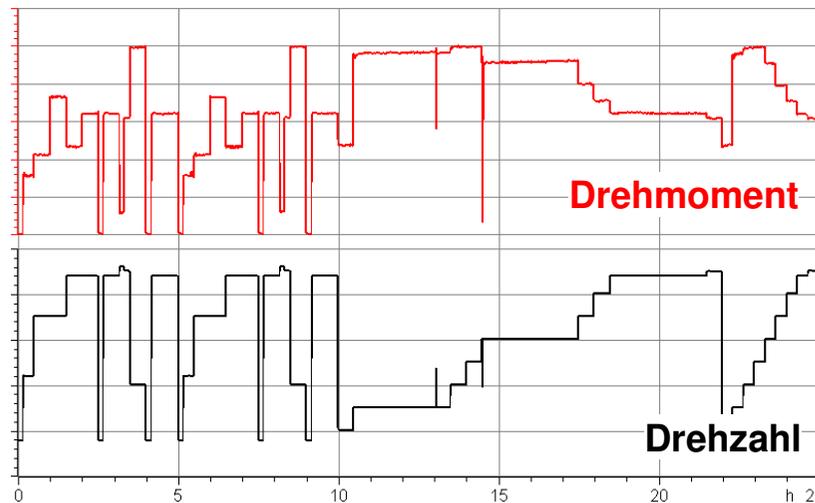
Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

- ▶ Hohe Lasten und Drehzahlen von Beginn an
- ▶ Steigerung auf Maximaldrehzahl und Maximallast bereits nach kurzer Zeit

- ▶ Geringe Lasten und Drehzahlen, die langsam schrittweise gesteigert werden



Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatemanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung



Verschleißverläufe über Laufzeit

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

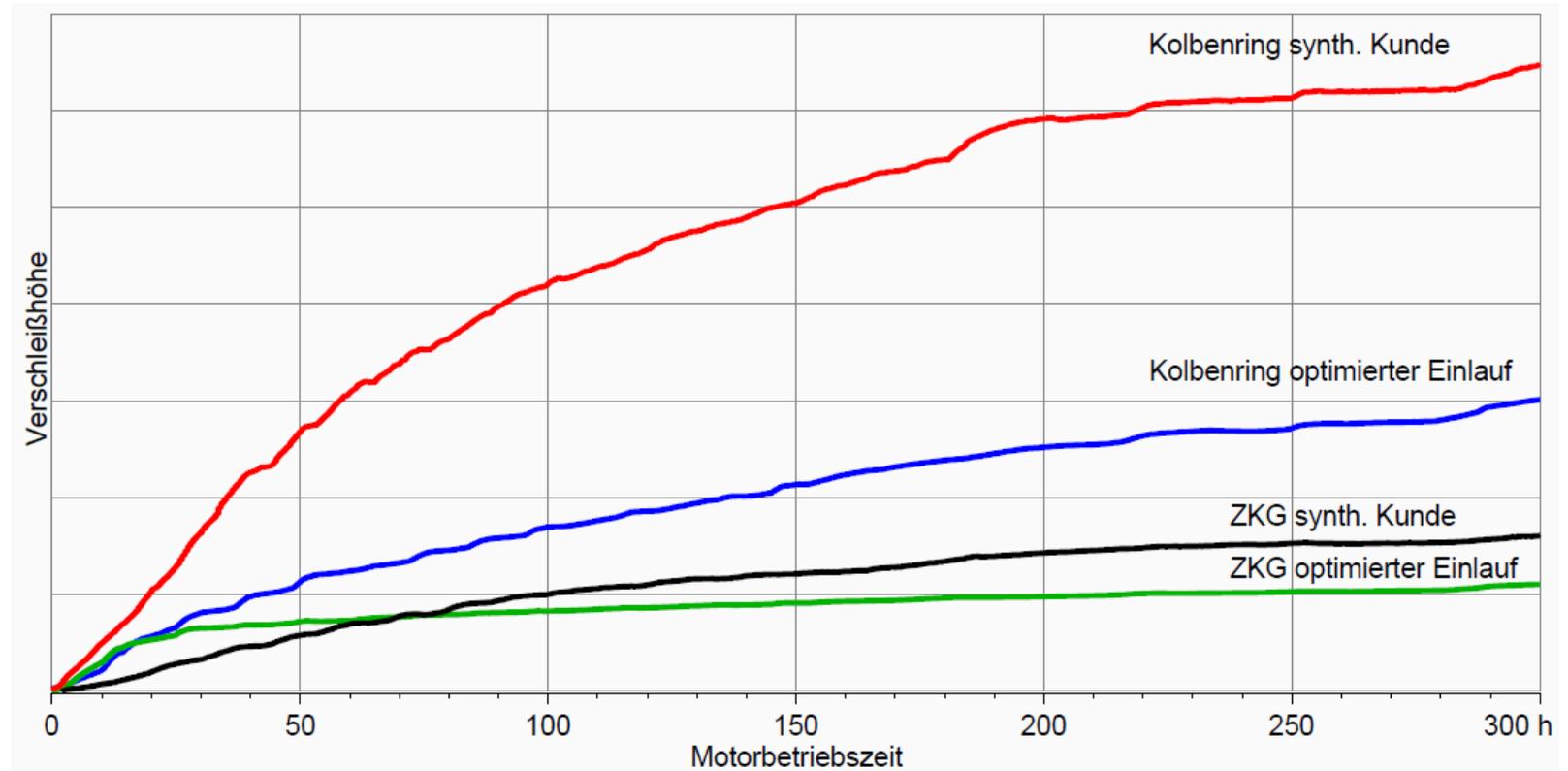
Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung



Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatmanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung



Verschleiß im Kennfeld

Kolbenring

ZKG

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

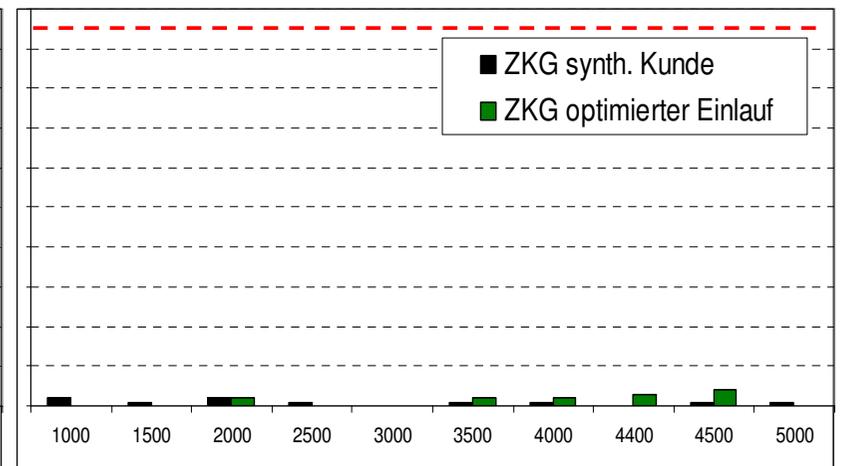
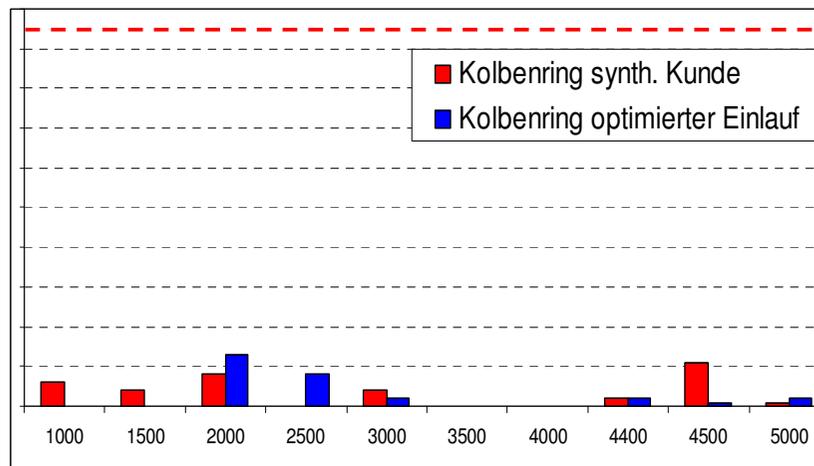
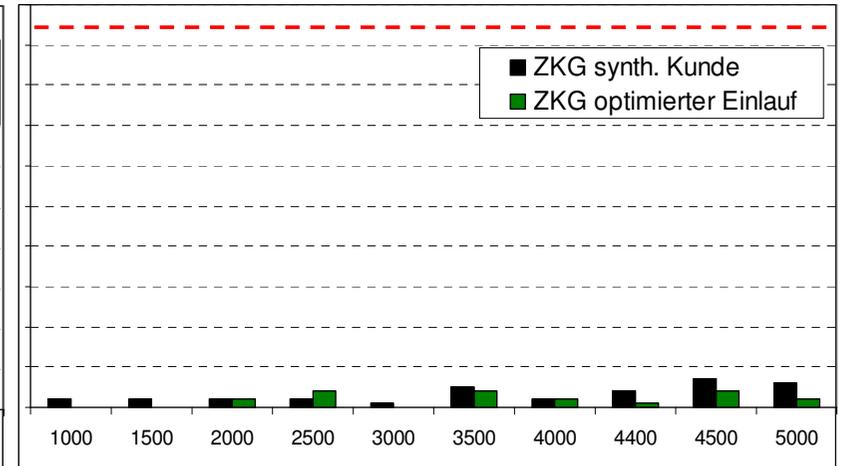
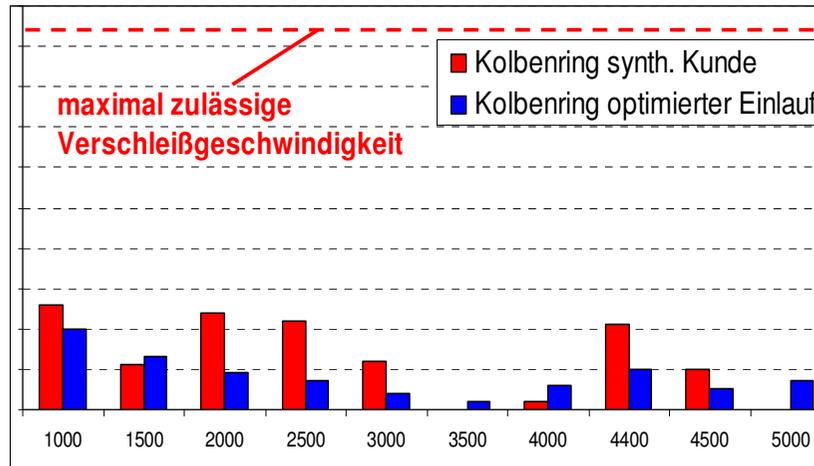
Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

Volllast

50% Volllast



Verschleiß bei Start-Stopp

Warum Start-Stopp ?

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung



- ▶ Start-Stopp-Systeme bieten großes Potenzial hinsichtlich Kraftstoffeinsparung
- ▶ Besonders effektiv ist die Start-Stopp-Technik im Stadtverkehr
- ▶ Auf Autobahnen ohne Stop and Go-Verkehr kein Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch

Variationsmöglichkeiten bei Start-Stopp

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

- ▶ Lagerschalen (z.B. Werkstoffe, Rauheit, Geometrie, Spiel,...)
- ▶ Kurbelwelle (z.B. Rauheit, Spiel,...)
- ▶ Zwischenstoff (z.B. Viskosität, Additivierung,...)
- ▶ Kräfte (z.B. im Nebenaggregatetrieb,...)
- ▶ Zeiten (z.B. Stillstandszeiten des Start-Stopp-Vorgangs,...)
- ▶ ...



Start-Stopp – Einfluss Stopp-Zeit

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

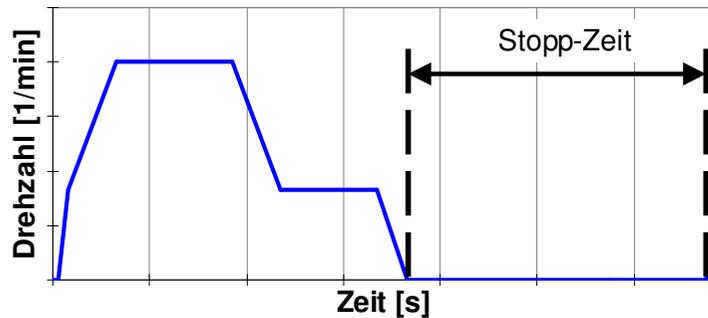
Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

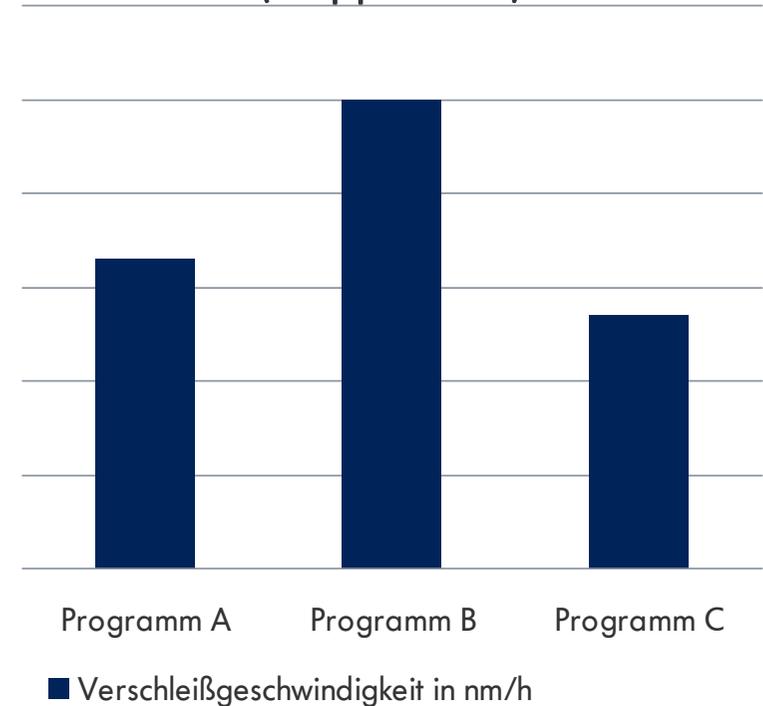


Stopp-Zeit: $A < B < C$

Fazit:

- ▶ Stopp-Zeit beeinflusst Verschleißgeschwindigkeit
- ▶ Motor länger aus
= Ölrückfluss Verschleiß steigt
= Ölabbkühlung Verschleiß sinkt

Einfluss Start-Stopp-Programm (Stopp-Zeiten)



Start-Stopp – Einfluss Rauheit Kurbelwelle

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

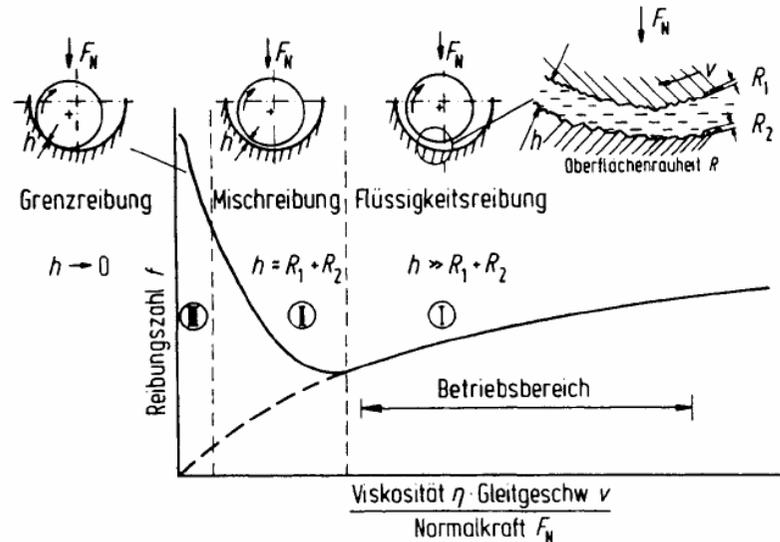
Messverfahren

Einlauf

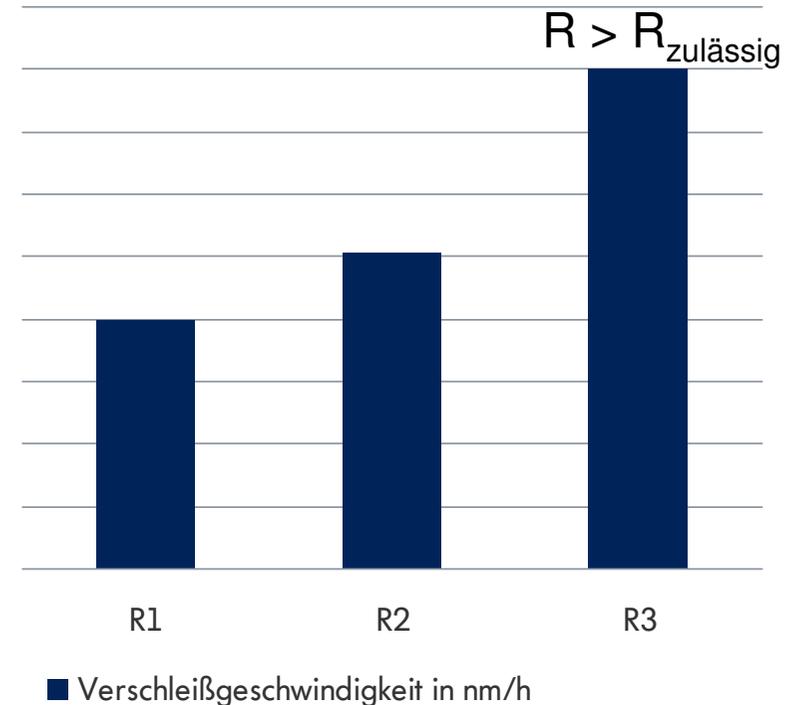
Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung



$$R_1 < R_2 < R_3$$



Fazit:

- ▶ kleinere Rauheit KW → niedriger Verschleiß
- ▶ überproportional zunehmender Verschleiß bei $R > R_{\text{zulässig}}$
- ▶ über Laufzeit Veränderung der Rauheit zu mittlerem Niveau



Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatemanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung



Start-Stopp – Spannkraft Nebenaggregatetrieb

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

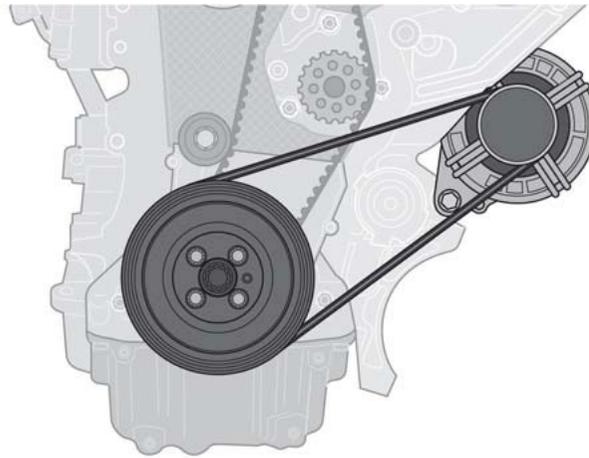
Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

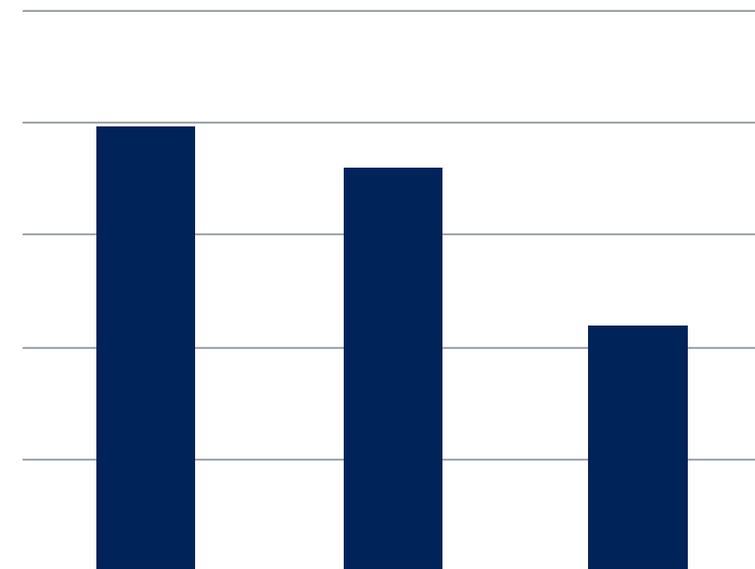
Zusammenfassung



Fazit:

- ▶ hohe Spannkraft führt zu hohem Verschleiß
- ▶ Bei Verschleiß auf niedrigem Niveau wirkt sich eine Variation der Spannkraft weniger aus.

$$F_1 > F_2 > F_3$$



■ Verschleißgeschwindigkeit in nm/h



Aggregateentwicklung

Aggregate-Testcenter • Antriebs-Elektronik • Aggregatemanagement • Dieselmotorenentwicklung • Fahrzeugintegration Antrieb • Getriebeentwicklung • Ottomotorenentwicklung

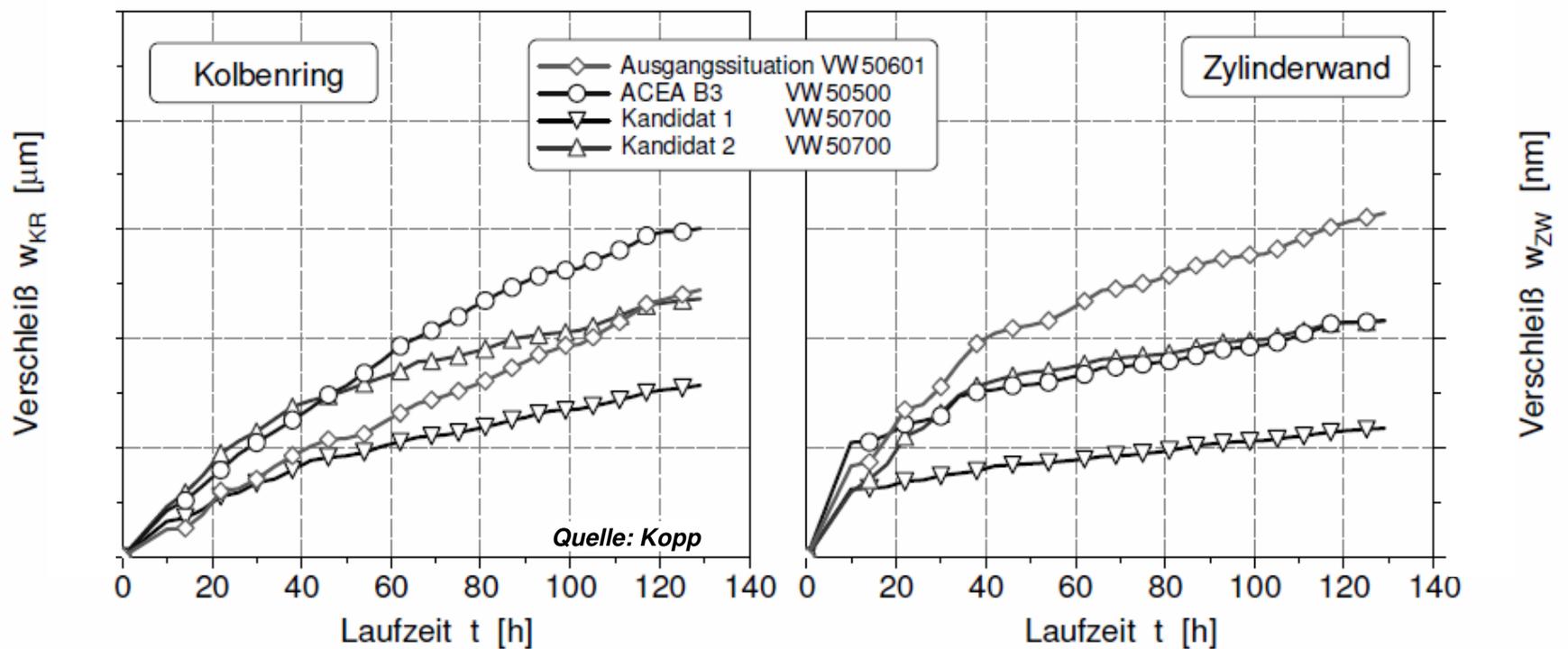


ZKG/KR-Verschleiß in Abhängigkeit vom Motoröl und der Ringbeschichtung



Motorölvariation

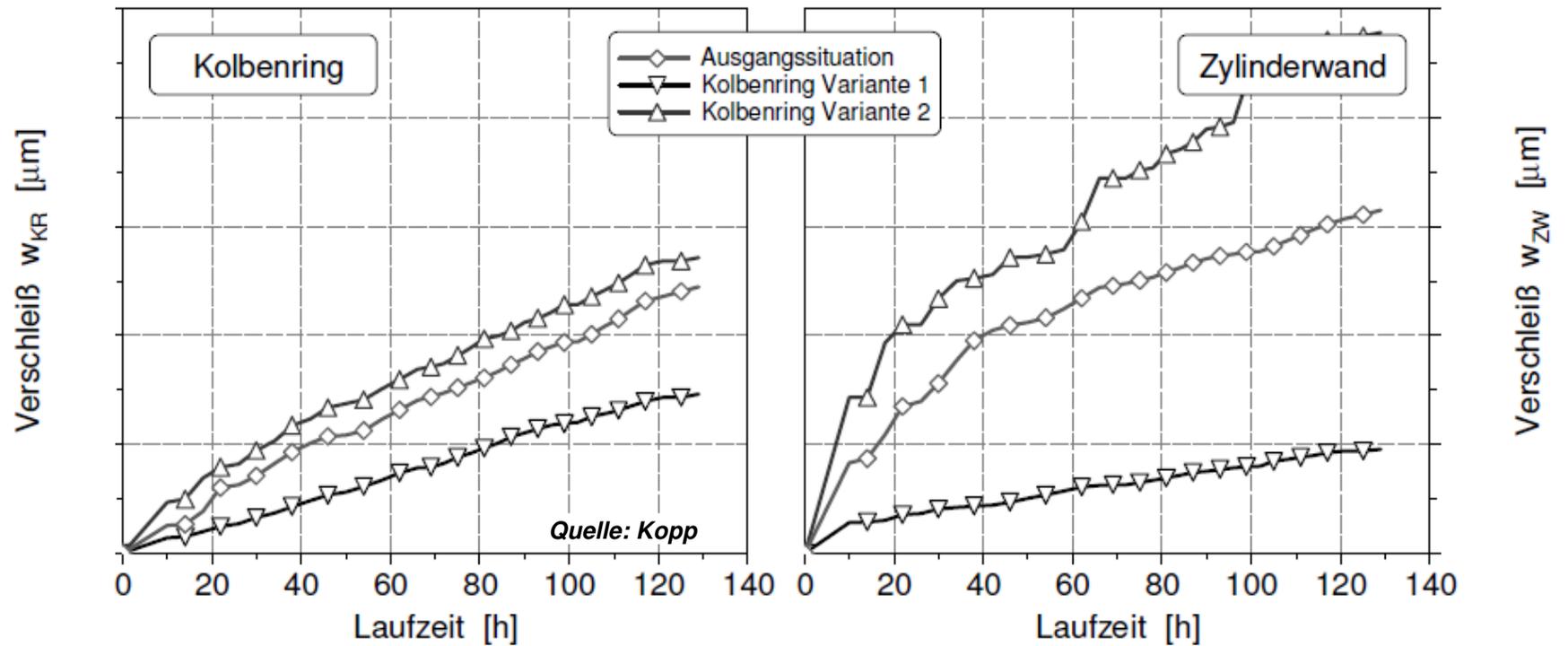
Verschleißbegriff
 Verschleiß-
 mechanismen
 Vorteile der RNT
 Mögliche Bauteil-
 untersuchungen
 Messverfahren
 Einlauf
 Start-Stopp
ZKG/KR-Verschleiß
 Zusammenfassung



- ▶ **Ausgangssituation:** Serienmotoröl nach VW50601 in der Viskositätsklasse SAE 0W30
- ▶ **Kandidat 1 und 2:** Ölvarianten nach VW50700 in der Viskositätsklasse SAE 5W30
- ▶ **ACEA B3:** Motoröl nach ACEA B3 in der Viskositätsklasse SAE 5W40

Variation Ringbeschichtung

Verschleißbegriff
 Verschleiß-
 mechanismen
 Vorteile der RNT
 Mögliche Bauteil-
 untersuchungen
 Messverfahren
 Einlauf
 Start-Stopp
ZKG/KR-Verschleiß
 Zusammenfassung



- ▶ **Ausgangssituation:** feine Keramikpartikel aus Aluminiumoxid in Chrommatrix
- ▶ **Variante 1:** homogene Chromnitrid-Schicht, Beschichtung im PVD-Prozess
- ▶ **Variante 2:** Diamantpartikel in Chrommatrix

Zusammenfassung

Verschleißbegriff

Verschleiß-
mechanismen

Vorteile der RNT

Mögliche Bauteil-
untersuchungen

Messverfahren

Einlauf

Start-Stopp

ZKG/KR-Verschleiß

Zusammenfassung

- ▶ Die RNT unterscheidet 2 Messverfahren – das Konzentrationsmessverfahren und das Dünnschichtdifferenzmessverfahren.
- ▶ Die Radio-Nuklid-Verschleißmesstechnik ermöglicht frühzeitige Analysen vielfältiger tribologischer Systeme und Aussagen zum Verschleißverhalten.
- ▶ Der Einlauf eines tribologischen Systems hat wesentlichen Einfluss auf das Verschleißverhalten.
- ▶ Die Grundsätze des Strahlenschutzes sind unbedingt zu beachten und wesentlicher Bestandteil der täglichen Arbeit!

