

HF-gerechte Installation von Lüftungsanlagen mit Frequenzumrichter- Regelung

Andreas Binder

Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung

Landgraf-Georg-Strasse 4, D-64283 Darmstadt
abinder@ew.tu-darmstadt.de



Inhaltsübersicht

- **du/dt -Effekte durch Umrichterspeisung**
- **Einsatz von FI-Schutzschaltern**
- **Ventilatorparallelbetrieb: Einfluss der Leitungslänge**
- **Geschirmte Leitungen**
- **Lagerströme – Filter**
- **Zusammenfassung**



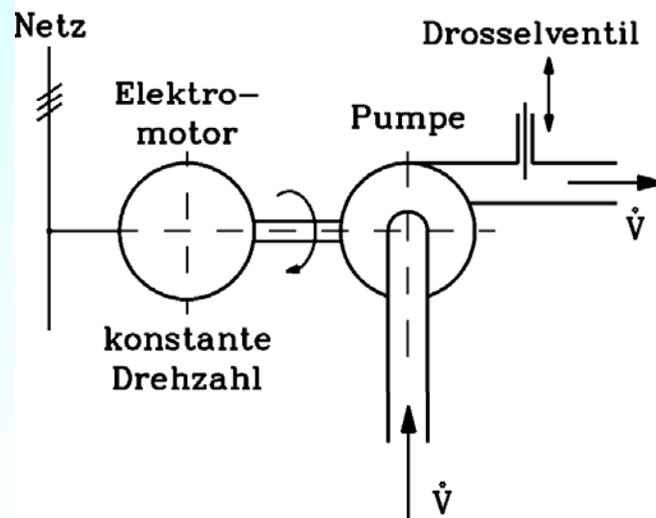
HF-gerechte Installation von Lüftungsanlagen mit Frequenzumrichter-Regelung

- **du/dt -Effekte durch Umrichterspeisung**
- **Einsatz von FI-Schutzschaltern**
- **Ventilatorparallelbetrieb: Einfluss der Leitungslänge**
- **Geschirmte Leitungen**
- **Lagerströme – Filter**
- **Zusammenfassung**

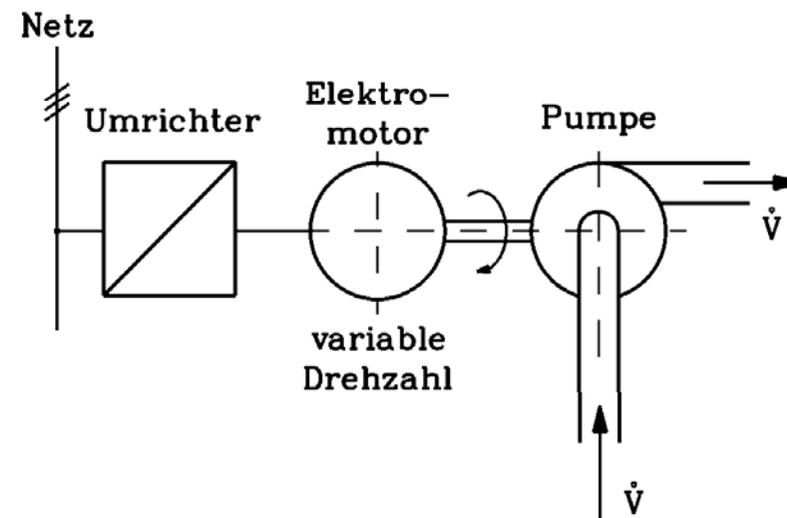


Vorteile durch umrichtergeriegelte Ventilatoren

- **Drehzahlvariable** Antriebe erlauben kontinuierlich veränderbaren Volumenstrom
- **Energieeinsparung** gegenüber Festdrehzahlantrieb mit Drosselung
- **Dynamische Regelung** erfordert **schnell schaltende** Umrichter



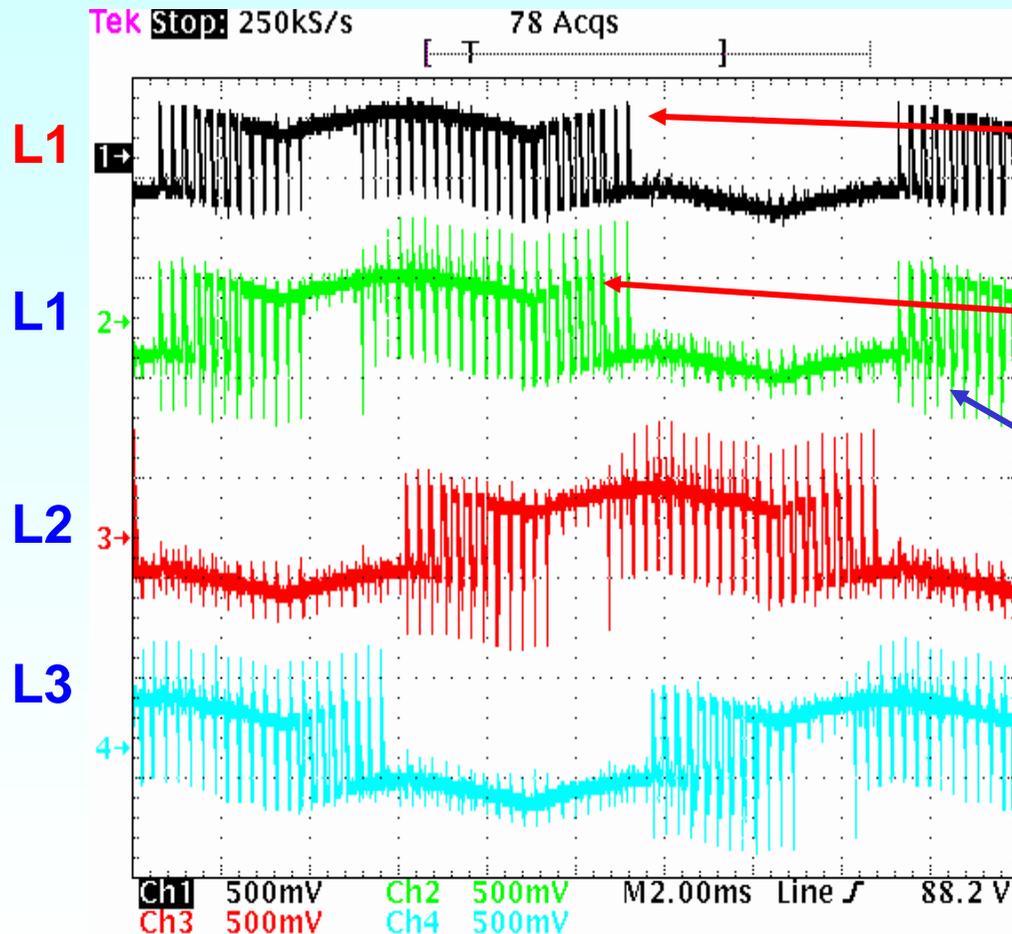
Volumenstrom über
Drosselventil verändert



Volumenstrom über
Drehzahl verändert

Umrichterausgangsspannung

- Schnelles Schalten zwischen Null und Zwischenkreisspannung U_d :
- *Beispiel*: zwischen 0 und +600 V bzw. -600 V (am 400 V AC-Netz)



**Umrichter-
ausgangsspannung**

Motorklemmenspannung

Reflexion

- Schaltzeit t_r typisch $0.100 \mu\text{s}$

- Spannungssteilheit: *Beispiel*:

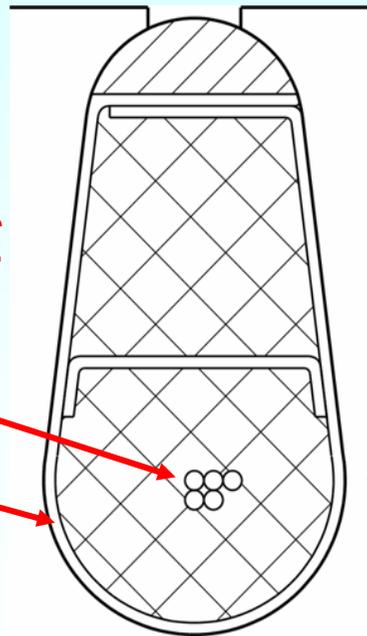
$$\frac{du}{dt} = \frac{U_d}{t_r} = \frac{600\text{V}}{0.1\mu\text{s}} = 6\text{kV} / \mu\text{s}$$

Kapazitive Parasitärströme

- Kleine (parasitäre) Kapazitäten C in der **Motorzuleitung** und im **Elektromotor** werden bei den „Spannungssprüngen“ umgeladen = **parasitärer Umladestrom i_C**
- **Beispiel:** Kapazität der Motor-Ständerwicklung gegen das Blechpaket (geerdet)

Wicklung in einer Ständernut des E-Motors

- Wicklungsdrähte
- Nutisolation bildet **Kapazität C** gegen das geerdete Blechpaket



$$i_C = C \cdot \frac{du}{dt}$$

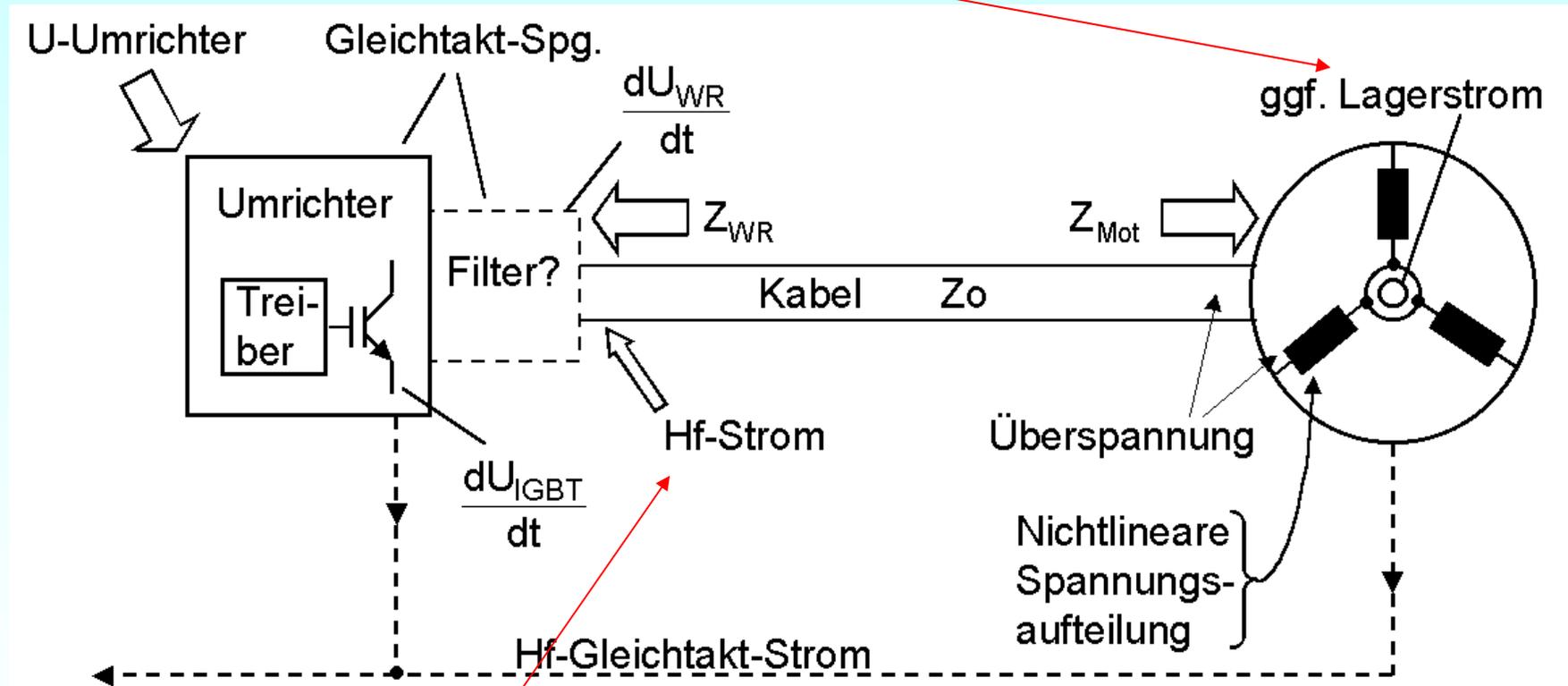
$$C = 100 \text{ pF} :$$

$$i_C = 100 \text{ pF} \cdot 6 \text{ kV} / \mu\text{s} = 0.6 \text{ A}$$

- **Fehlerstrom gegen Erde !**

du/dt -Effekte in Umrichtern und E-Motoren

Parasitäre HF-Ströme in der Maschine



Parasitäre HF-Ströme gegen Erde

HF-gerechte Installation von Lüftungsanlagen mit Frequenzumrichter-Regelung

- **du/dt -Effekte durch Umrichterspeisung**
- **Einsatz von FI-Schutzschaltern**
- **Ventilatorparallelbetrieb: Einfluss der Leitungslänge**
- **Geschirmte Leitungen**
- **Lagerströme – Filter**
- **Zusammenfassung**



Einsatz von FI-Schutzschaltern

- Auslöseschwelle für den Fehlerstrom:

30 mA: Personenschutz, 300 mA: Brandschutz

- **Herkömmlicher FI**: reagiert auf netzfrequenten Fehler-Wechselstrom

- **„Allstromsensitiver“ FI**: reagiert auch auf Fehler-Gleichstrom:

Für Umrichter nötig, da Gleichrichtung im Zwischenkreis

ABER: Parasitärer HF-Strom gegen Erde wird von beiden FI's als Fehlerstrom interpretiert: **Fehlauslösung**

Abhilfe: a) Bei 300 mA Fehlauslösung selten

b) Erdschlusswächter statt 300 mA-FI Für Brandschutz



HF-gerechte Installation von Lüftungsanlagen mit Frequenzumrichter-Regelung

- du/dt -Effekte durch Umrichterspeisung
- Einsatz von FI-Schutzschaltern
- **Ventilatorparallelbetrieb: Einfluss der Leitungslänge**
- Geschirmte Leitungen
- Lagerströme – Filter
- Zusammenfassung



Umrichter-Schaltflanken und Reflexionen am Motor

- Einschalten eines Spannungs-Impulses „0 auf U_d “ am Umrichter: **Schaltzeit t_r**
- Spannungswelle U_d wandert vom Umrichter zum Motor mit Lichtgeschwindigkeit $v = \text{ca. } c_0/2$ in der **Wanderwellenzeit t_p**
- Motorwellenwiderstand größer als der vom Motorkabel: **Spannungsreflexion mit Spannungserhöhung am Motor**

- Beispiel 1:

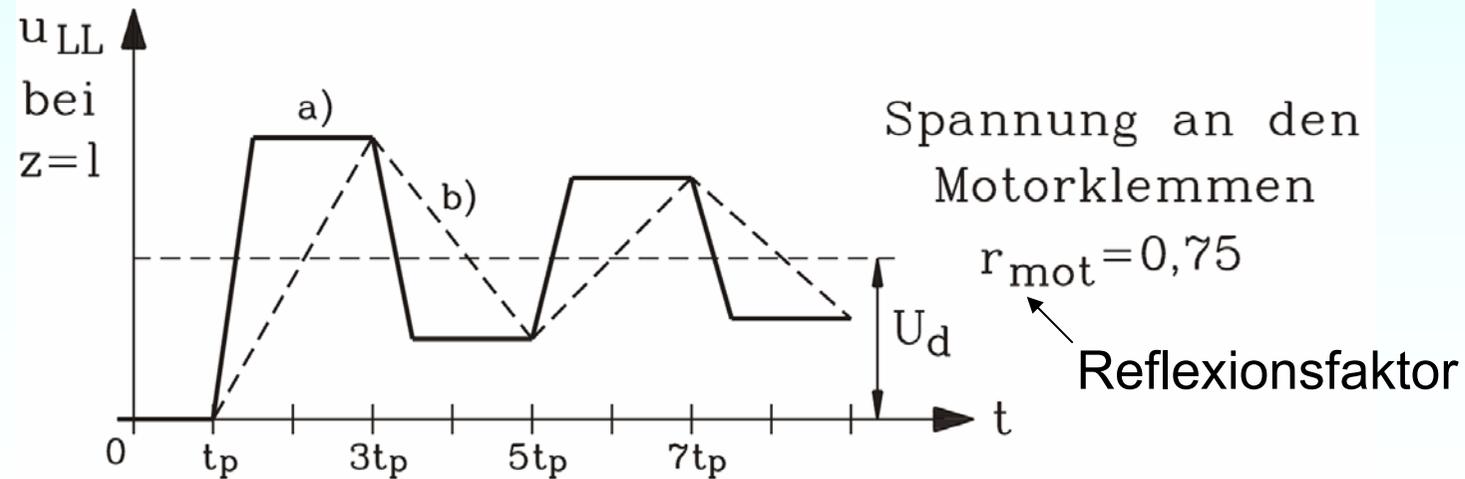
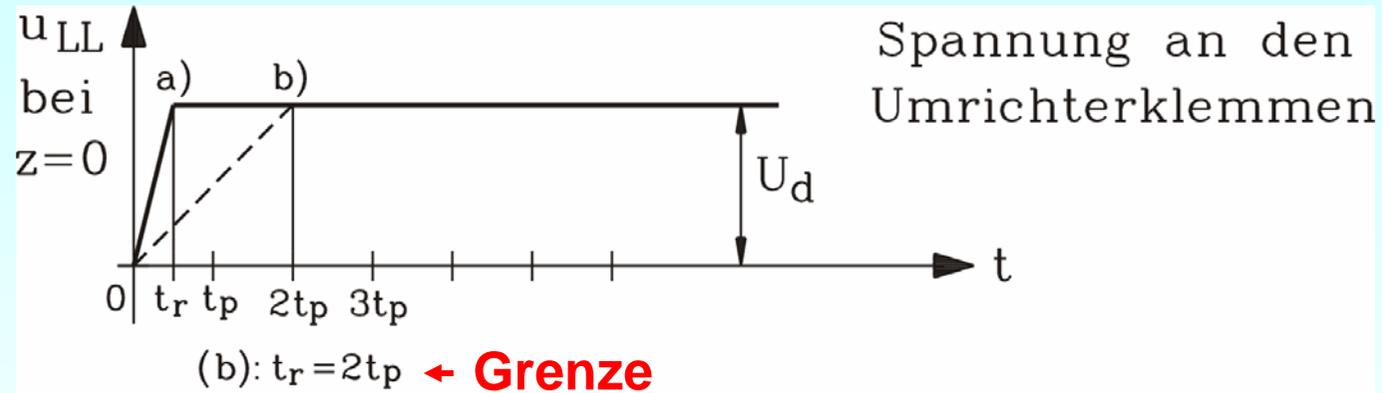
$U_d = 600 \text{ V}$, VOLLE Reflexion (worst case): am Motor 1200 V !

- Beispiel 2: $v = c_0 / 2 = 150 \text{ km/ms}$
 $l = 40 \text{ m} : t_p = l / v = 0.26 \mu\text{s}$
 $\text{Schaltzeit } t_r = 0.1 \mu\text{s}$



Umrichter-Schaltflanken und Reflexionen am Motor

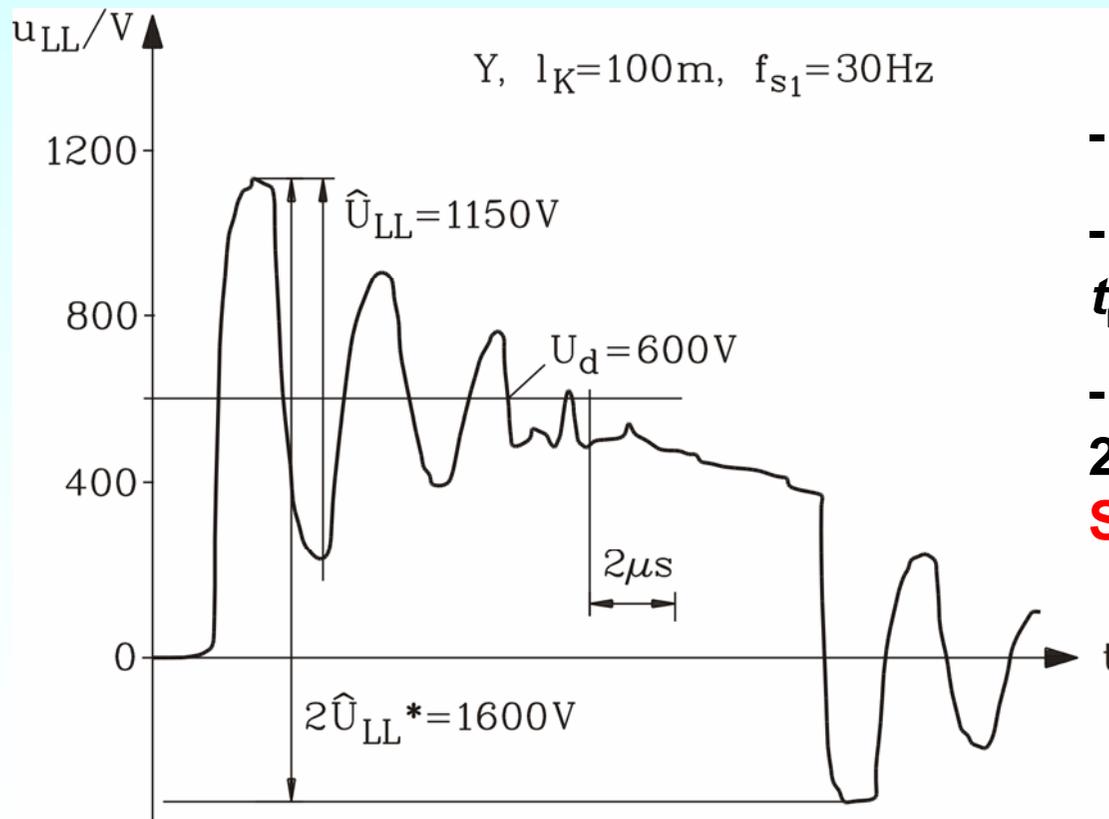
- Solange t_r kürzer als $2t_p$ ist, tritt volle Reflexion auf.
- Grenze: „Kritische Leitungslänge“: $l_{krit} = c_0 \cdot t_r / 4$



Spannungsreflexionen bei „langer“ Motorleitung

Messung: 2-poliger Käfigläufer-Asynchronmotor, 400 V, Y

Umrichterbetrieb: Motorzuleitung 100 m, 600 V Zwischenkreis-
spannung



- Laufzeit $t_p = 666$ ns
- Spannungsanstiegszeit: $t_r = 500$ ns
- Da $t_r = 500$ ns kürzer als $2t_p = 1330$ ns, **daher volle Spannungsreflexion**

Kritische Leitungslänge

- **Achtung:** Bei schnell schaltenden Umrichtern ist die kritische Leitungslänge BALD überschritten !

- **Beispiel:** $t_r = 0.1 \mu s : l_{krit} = 7.5 m$

- Abhilfen:

- „Umrichterfeste“ Motoren (verbesserte Wicklungsisolation)
- *du/dt*-Filter: Erhöht t_r am Umrichterausgang = Erhöhung der kritischen Leitungslänge
- „Sinusfilter“ am Umrichterausgang: Strangspannung und verkettete Spannung sinusförmig = keine Reflexionen

ABER: Spannungsfall am Filter, zusätzliche Verluste



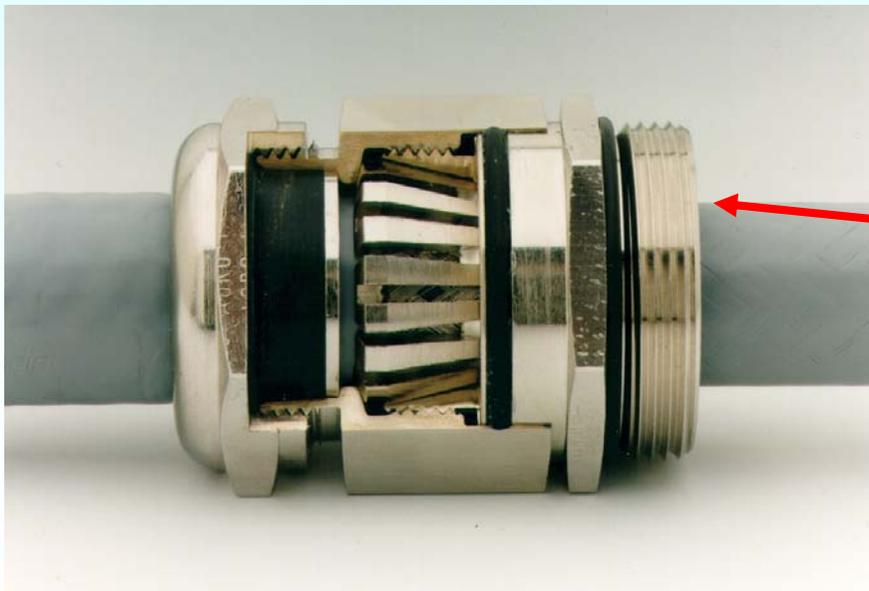
HF-gerechte Installation von Lüftungsanlagen mit Frequenzumrichter-Regelung

- **du/dt -Effekte durch Umrichterspeisung**
- **Einsatz von FI-Schutzschaltern**
- **Ventilatorparallelbetrieb: Einfluss der Leitungslänge**
- **Geschirmte Leitungen**
- **Lagerströme – Filter**
- **Zusammenfassung**



Geschirmte Leitungen

- Gepulste Spannung & HF-Strom erregen HF-elektromagnetische Felder längs der Motorleitung, die in benachbarte Geberleitungen etc. **Störspannungen einkoppeln**
- Abhilfe: **Geschirmte Leitungen**, aber HF-Geflecht-Schirm muss **vollflächig** auf metallischem Umrichter- und Motorgehäuse angebracht sein. **Keine „Sauschwanz“-Lösung !**



An **Trennstellen** von Leitungen müssen **EMV-gerechte Stecker** für vollflächige Verbindung sorgen !

HF-gerechte Installation von Lüftungsanlagen mit Frequenzumrichter-Regelung

- **du/dt -Effekte durch Umrichterspeisung**
- **Einsatz von FI-Schutzschaltern**
- **Ventilatorparallelbetrieb: Einfluss der Leitungslänge**
- **Geschirmte Leitungen**
- **Lagerströme – Filter**
- **Zusammenfassung**



Gleichtaktspannung

- In **Drehstromsinusnetzen** ist die Summe aller drei Phasenspannungen gegen Erde stets NULL: **Keine Gleichtaktspannung**.
- Bei Umrichterbetrieb ist die Summe der 3 gepulsten Phasenspannungen NICHT Null: Sie schwankt zwischen $+U_d/2$ und $-U_d/2$: 300 V ... -300 V mit Schaltfrequenz (einige kHz !)

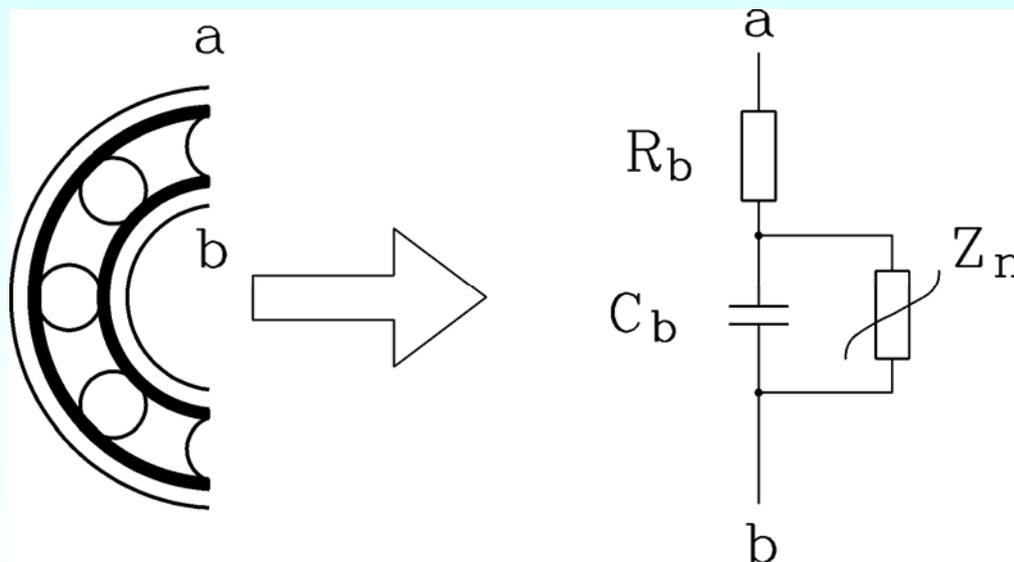
HF-Gleichtaktspannung:

$$u_0(t) = \frac{u_{L1}(t) + u_{L2}(t) + u_{L3}(t)}{3}$$

- $u_0(t)$ zwischen Wicklung und Gehäuse treibt großen HF-**Erdstrom** und zusätzlich **Parasitärströme** durch den E-Motor !

Lagerströme

- Das **Lager** mit dem Schmierfilm wirkt als kleine Kapazität C_b .
- Über die anderen Parasitärkapazitäten im E-Motor wird die Kapazität „**Schmierfilm**“ geladen (bis zu 30 V am Schmierfilm !)

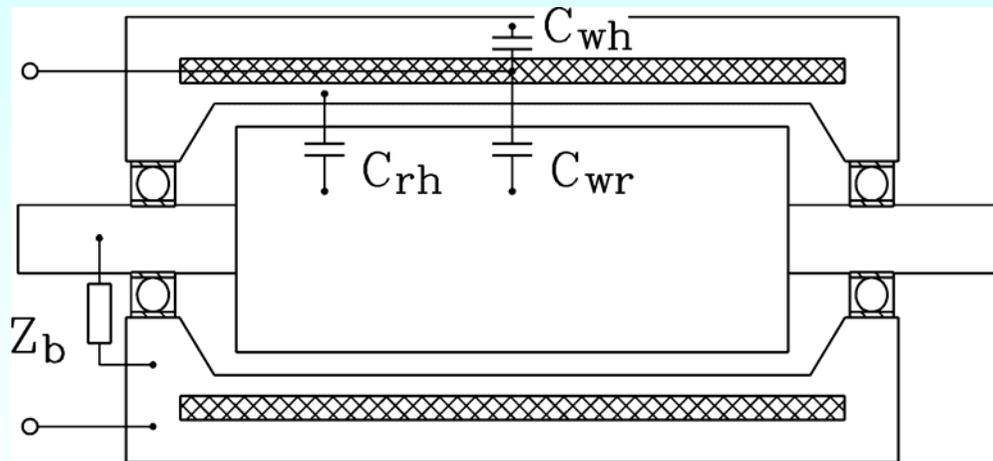


Lager elektrisches Ersatzschaltbild

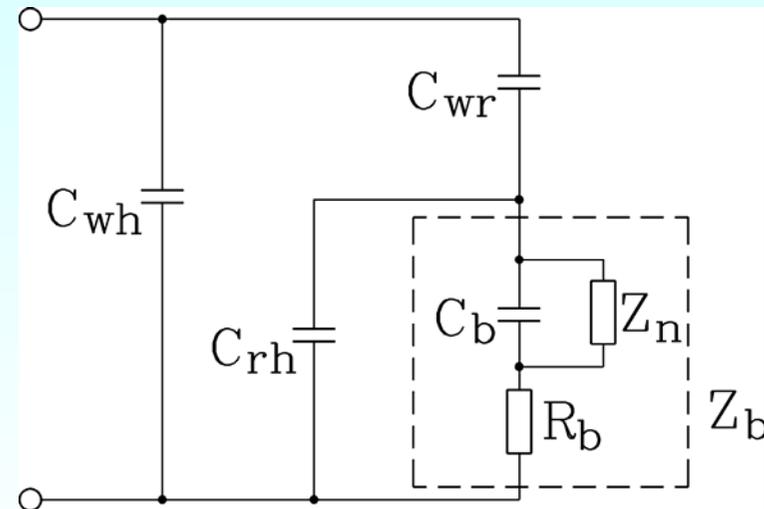
- Elektrischer Durchschlag des Schmierfilms !
- „**Krater**“ in der Kugellaufbahn führen zu „**Riffel**“
- Lager wird zu heiß:
Ausfall !

Parasitärströme im E-Motor

Parasitärströme fließen über die kleinen Kapazitäten im E-Motor: Wicklung-Gehäuse: C_{wh} , Wicklung-Rotor: C_{wr} , Rotor-Gehäuse: C_{rh})



E-Motor (Schnitt schematisch)

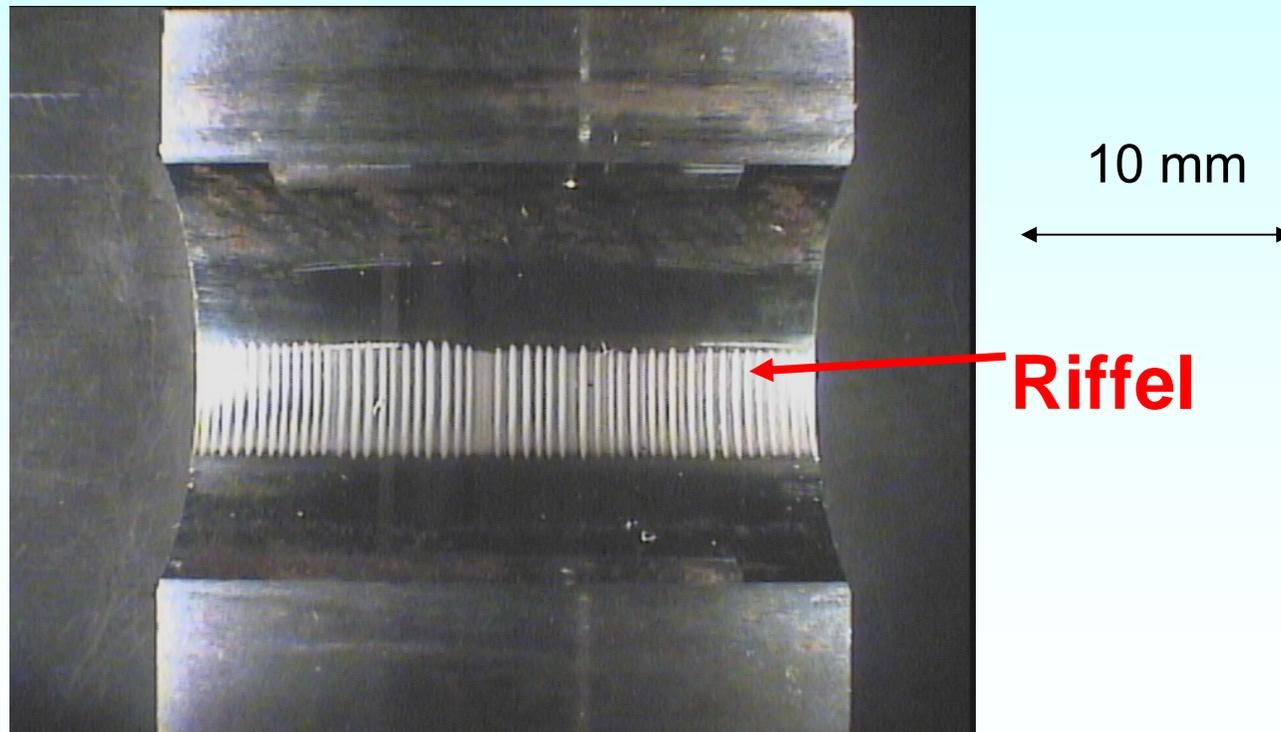


elektrisches Ersatzschaltbild

Lagerschaden Riffelbildung

-11 kW-Norm-Asynchronmotor:

-Rillenkugellager, Innenlaufbahn nach Stromdurchgang bei 1000 h Betriebszeit



Abhilfe gegen Lagerströme

- Gleichtakt-Spannung durch spezielles Filter am Umrichter-ausgang unterdrücken !

Gleichtaktspannungs-Unterdrückungsfilter ! NICHT:
Gleichtaktstrom-Unterdrückungsfilter !

- **Hybridkugellager:** Kugeln aus Keramik wirken wie Kondensator mit grossem Plattenabstand = kleines elektrisches Feld im Schmierfilm = Kein Durchschlag

Achtung:

- Fallweise hilft das **Isolieren der Lager**, aber nicht unbedingt, da Durchschlagstrom KEIN Kreisstrom !

- **Erdungsbürsten** überbrücken Lagerspannung, aber Bürstenkontakt ist unzuverlässig !



Zusammenfassung

- Dynamische Umrichterregelung von Lüftern bringt **Systemvorteile**, aber schnelles Schalten ruft **du/dt -Effekte** hervor.
- **Abhilfemaßnahmen** sind erforderlich !
- **FI-Schutzschalter-Fehlauslösung** muss vermieden werden !
- Ventilatorparallelbetrieb: **Einfluss der Leitungslänge** muss durch Filter oder „umrichterfeste“ Motoren beherrscht werden !
- **Geschirmte Leitungen** vermeiden HF-Störungen in anderen Betriebsmittel, ABER: sachgerechte Installation
- **Gleichtakt-U-Filter** verhindern Lagerströme UND HF-Störungen



Danke für Ihre Aufmerksamkeit !

