

Computerunterstützte Berechnung von Schenkelpol-Synchrongeneratoren für Wasserkraftwerke



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

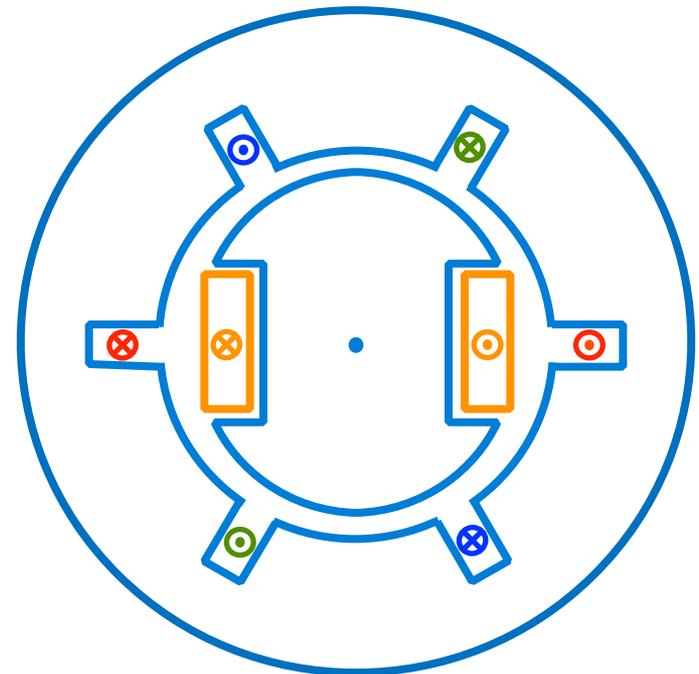


Institut für
Elektrische
Energiewandlung

Dr. Georg Traxler-Samek

ANDRITZ HYDRO AG,
Obnauerstraße 4, CH-6010 Kriens
Georg.Traxler-Samek@andritz.com

TU Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung



EINLEITUNG

Computerunterstützung

Berechnung von Hydrogeneratoren

DIMENSIONIERUNG

Komponenten

Dimensionierung der Statorwicklung

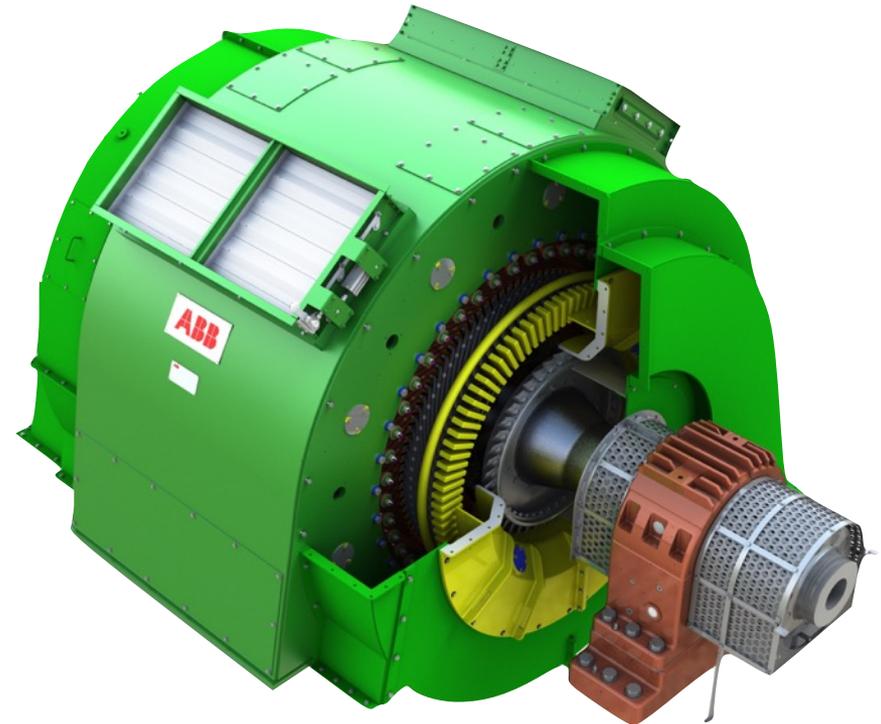
ELEKTRISCHE BERECHNUNGEN

Übersicht

Polschuh-Oberflächenverluste

OPTIMIERUNG

ZUSAMMENFASSUNG



Quelle: ANDRITZ Hydro

EINLEITUNG

Computerunterstützung

Berechnung von Hydrogeneratoren

DIMENSIONIERUNG

Komponenten

Dimensionierung der Statorwicklung

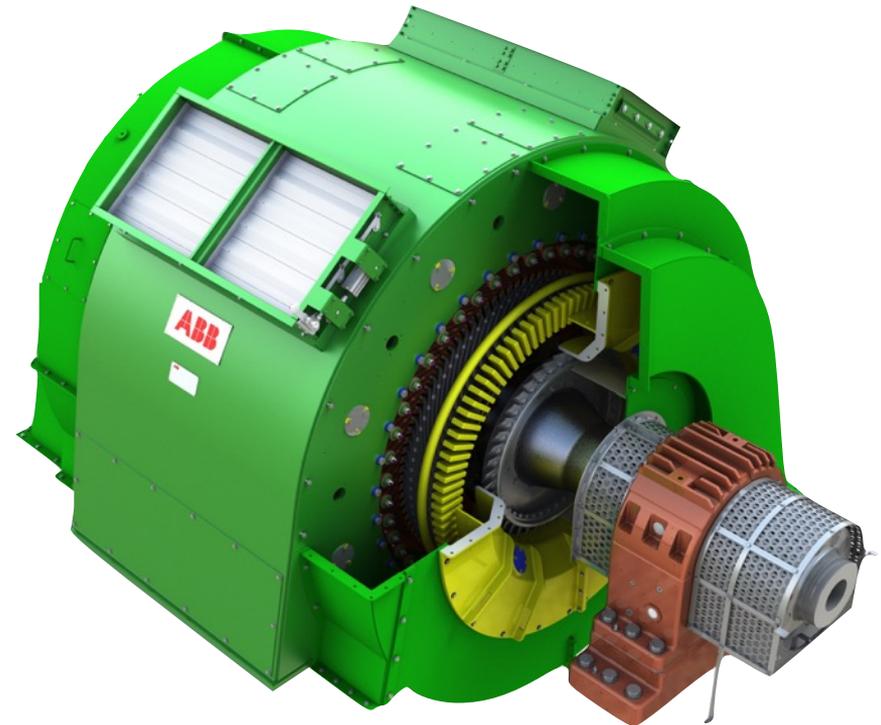
ELEKTRISCHE BERECHNUNGEN

Übersicht

Polschuh-Oberflächenverluste

OPTIMIERUNG

ZUSAMMENFASSUNG



Quelle: ANDRITZ Hydro

Einleitung - Computerunterstützung

Klassifizierung von Berechnungsprogrammen

A) nichtinteraktives Nachrechenprogramm

Basis: analytische Formeln

EINGABEDATEI

```
KW 1
12.5 1.32 4.54
0.324 0.124 1.234
```



AUSGABEDATEI

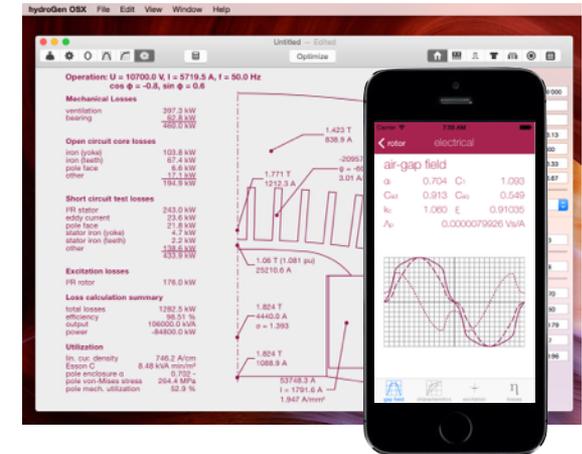
```
AUSGABE
=====
DURCHM. 2300 MM
```

B) interaktives Auslegungsprogramm

Basis: analytische Formeln

C) interaktives Auslegungsprogramm

Basis: analytische Formeln + numerische Methoden



D) interaktives Simulationsprogramm

Basis: numerische Methoden



FEM



CFD

Einleitung - Computerunterstützung

50 Jahre Computerunterstützung

historisch:

- Fortran-basierte **prozedurale Ansätze**
- Nachprogrammierung analytischer Formelsätze
- reine **Nachrechenprogramme**, basierend auf Eingabe- und Ausgabedatei

Heute:

- objektorientierte u. funktionale Ansätze
- Integration **numerischer Algorithmen**
- **Parallelisieren** von Berechnungen
- **Auslegungsunterstützung** und Optimierungen
- **interaktive Programme** mit grafischer Benutzeroberfläche

Quelle: www-03.ibm.com



Quelle: oldcomputers.net



Quelle: www-03.ibm.com



Quelle: www.apple.com

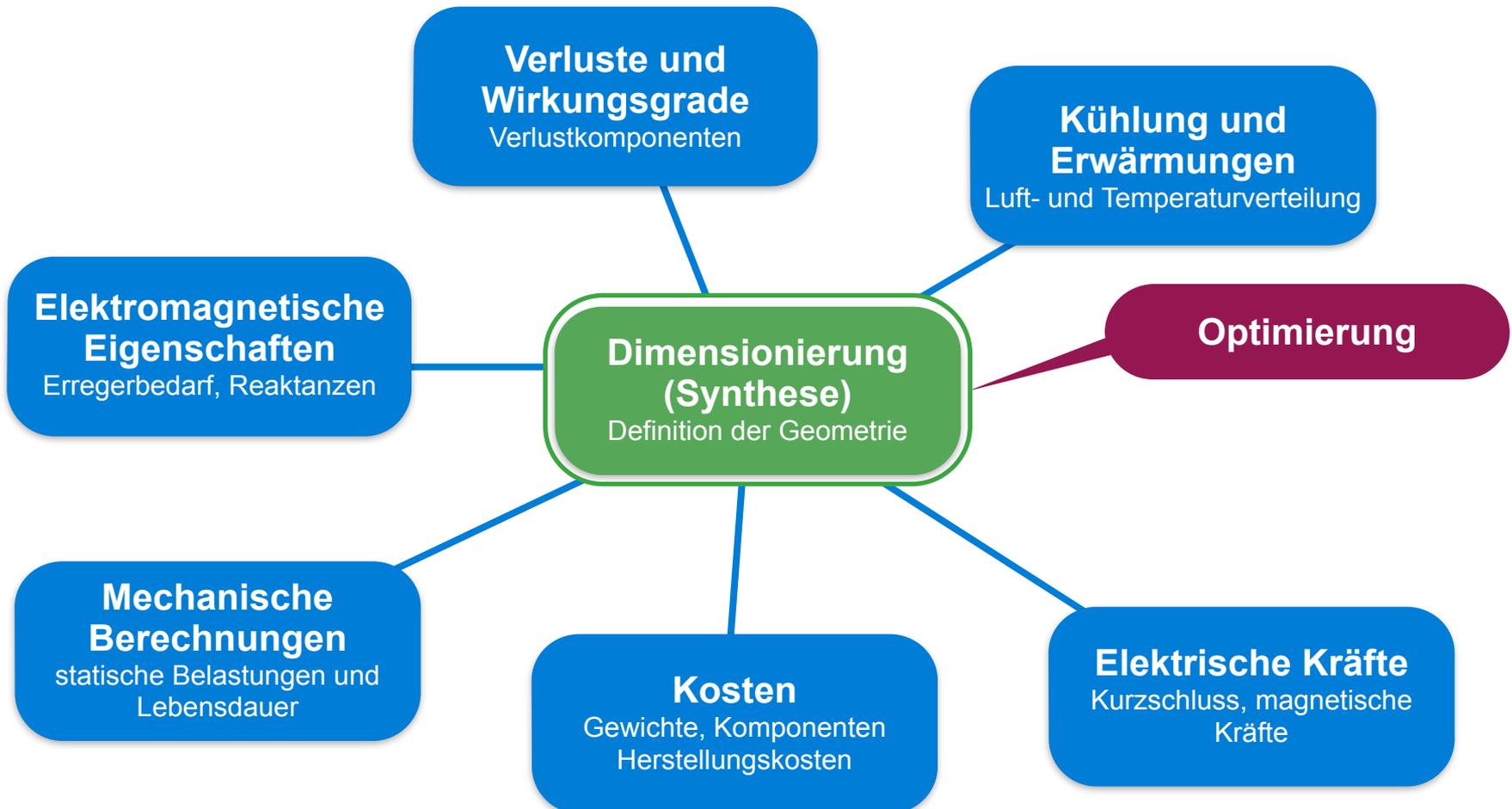


Quelle: www.apple.com



Einleitung - Berechnung v. Hydrogeneratoren

Dimensionierung (Synthese) und Nachrechnung



Einleitung - Berechnung v. Hydrogeneratoren

wichtige Aspekte

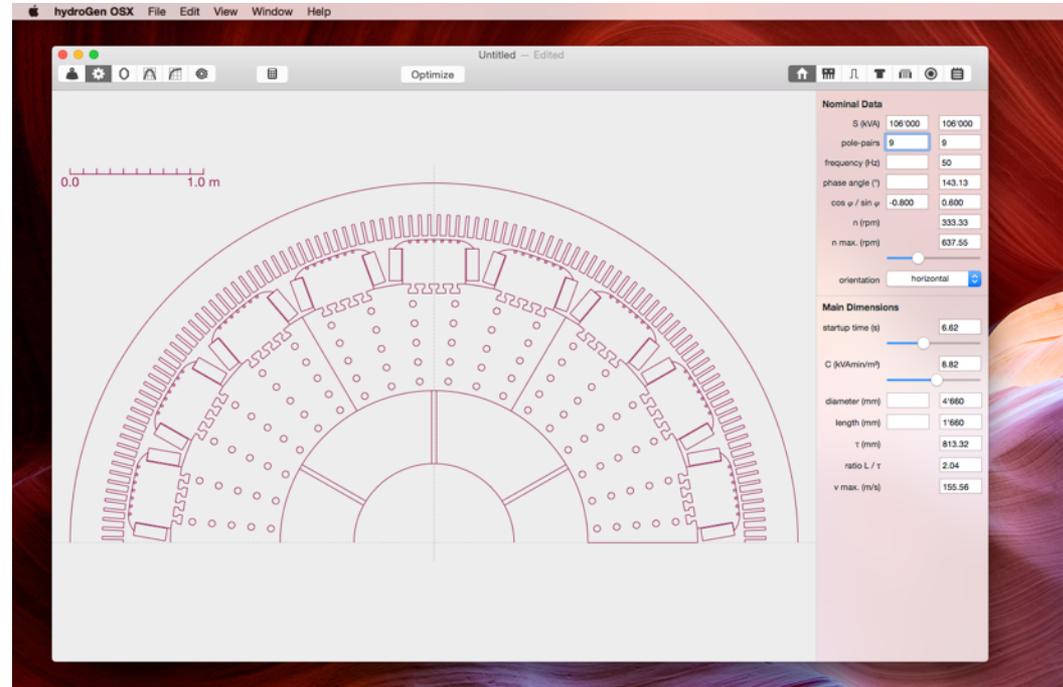
- **multidisziplinäre Optimierungsaufgaben** unter Einbezug von elektrotechnischen, kühlungstechnischen und mechanischen Aspekten
- **Vorgaben** für die elektromagnetische Auslegung (beispielsweise):
 - Leistungsdaten, Stator-Klemmenspannung
 - Platzverhältnisse (Generatorgrube, Montageverhältnisse)
 - maximal zulässige Erwärmungen (z.B. entsprechend IEC 60034)
 - maximal zulässige mechanische Beanspruchungen, minimale Anzahl von Start-Stopp-Zyklen bei hoher zyklischer Belastung

Alle Vorgaben sind bereits bei der elektromagnetischen Auslegung zu berücksichtigen!

Einleitung - Berechnung v. Hydrogeneratoren

Beispiel - Richtangebot

- Dimensionierung basierend auf wenigen Eckdaten (Anzahl Polpaare, Spannung, Scheinleistung, ...)
- keine detailoptimierte Lösung notwendig
- wenig Zeitaufwand: “in 10 min zur Lösung”
- automatisierte Datenblätter



Wichtige physikalische Zusammenhänge sind im Computer programmiert!

EINLEITUNG

Computerunterstützung

Berechnung von Hydrogeneratoren

DIMENSIONIERUNG

Komponenten

Dimensionierung der Statorwicklung

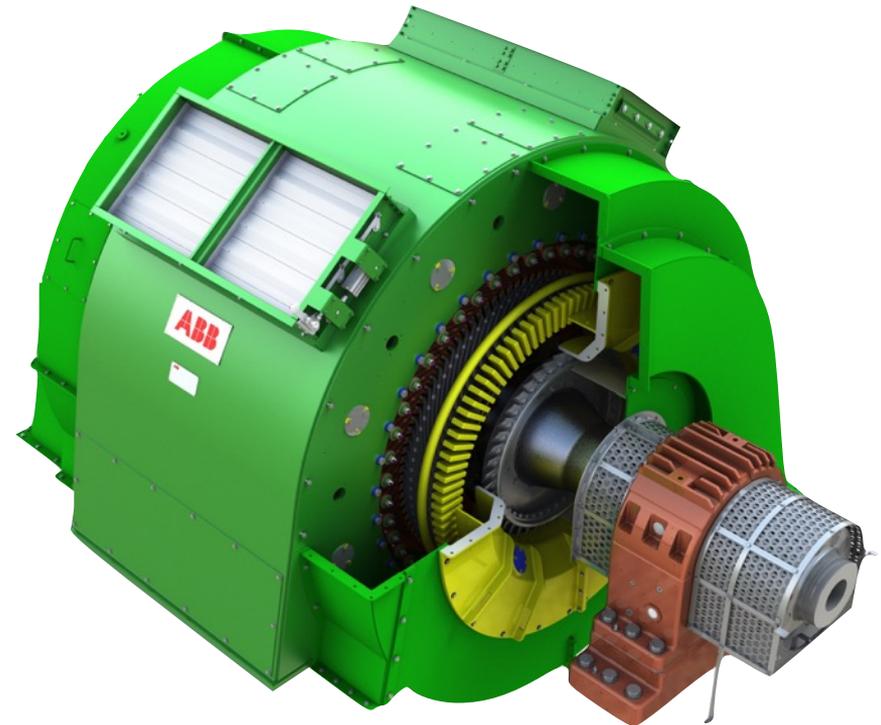
ELEKTRISCHE BERECHNUNGEN

Übersicht

Polschuh-Oberflächenverluste

OPTIMIERUNG

ZUSAMMENFASSUNG

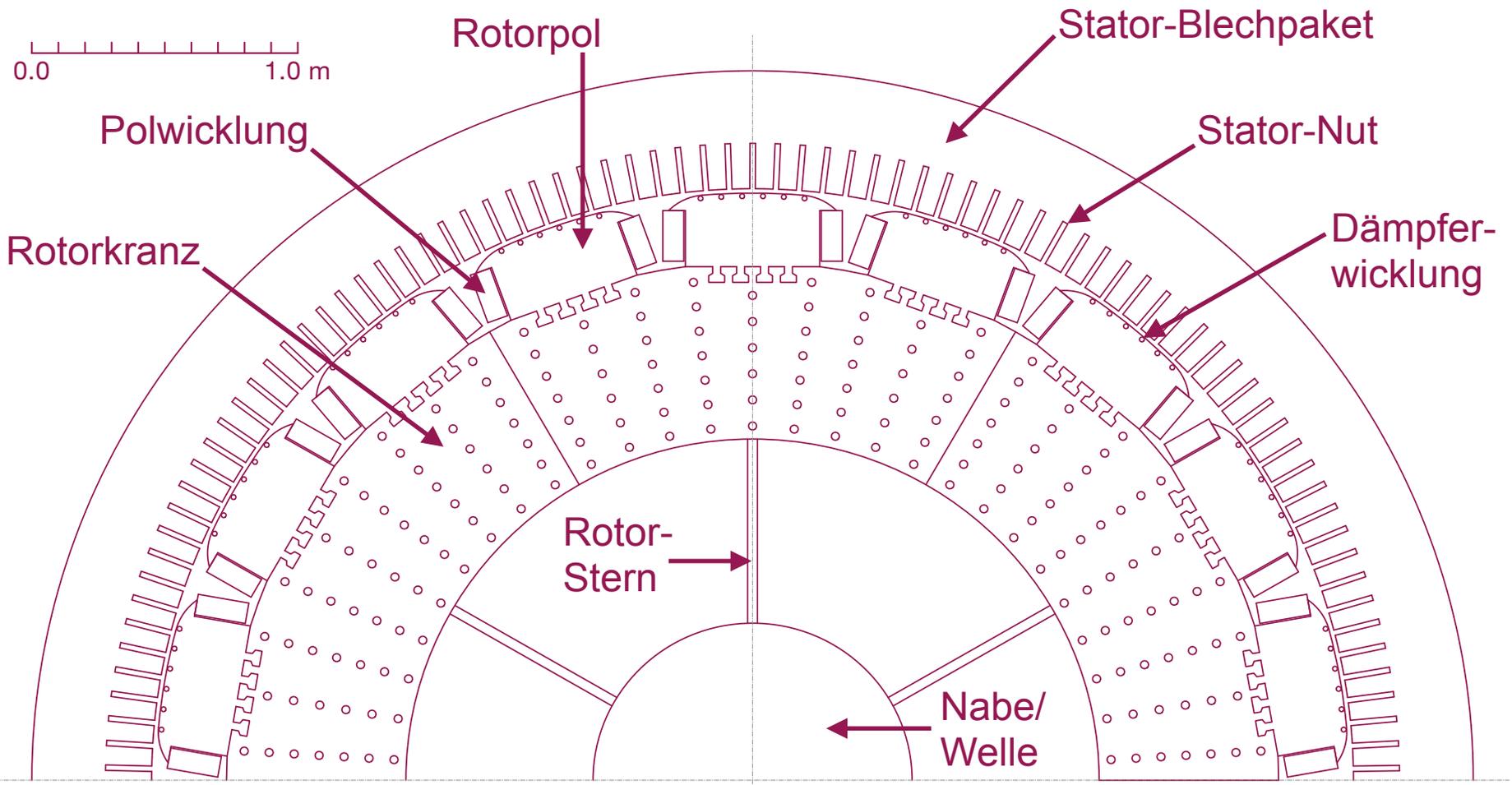


Quelle: ANDRITZ Hydro

AKTIV-KOMPONENTEN DER SYNCHRONMASCHINE

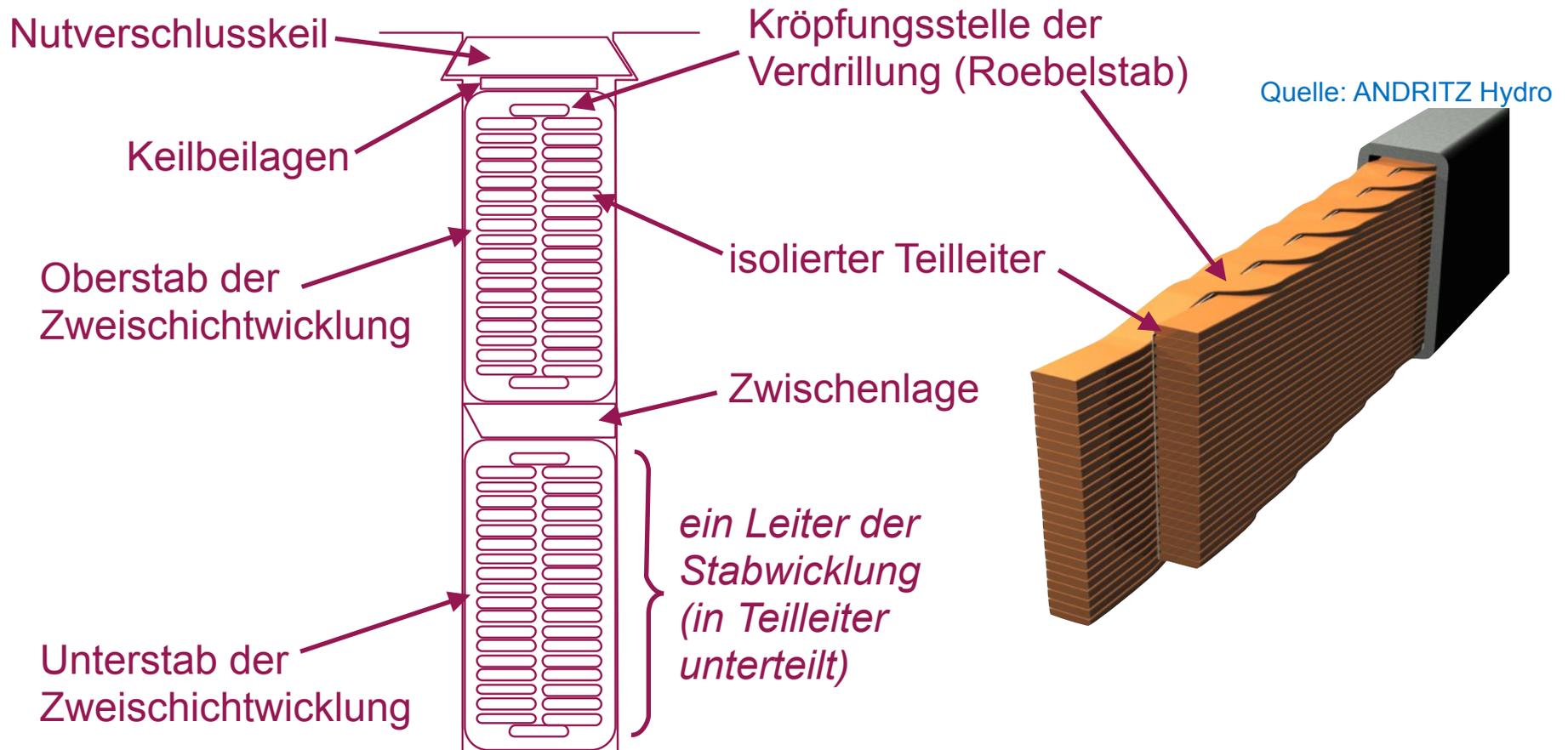
Dimensionierung - Komponenten

vereinfachte Schnittzeichnung der Aktivteile



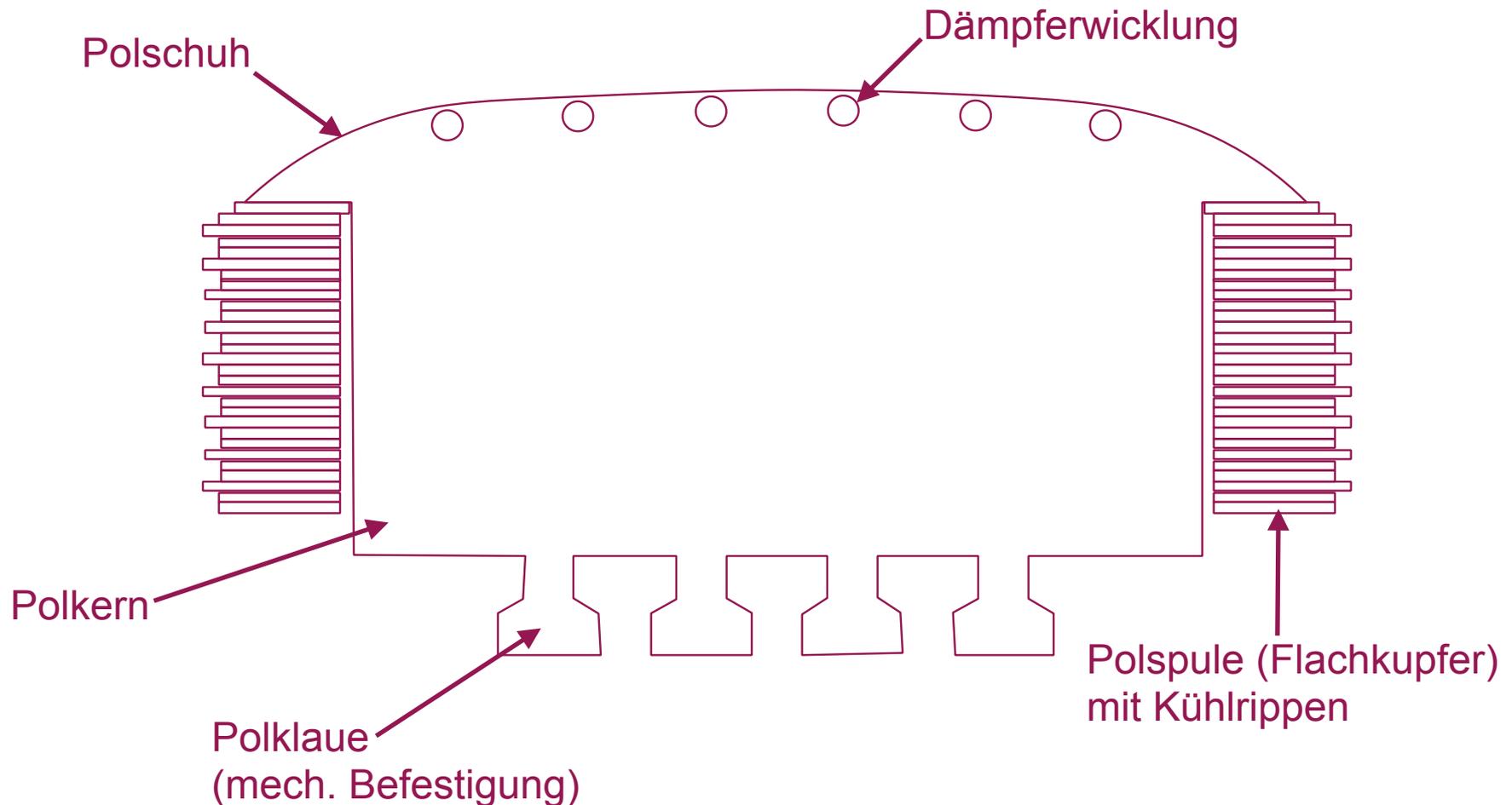
Dimensionierung - Komponenten

vereinfachte Schnittzeichnung einer Stator-Nut



Dimensionierung - Komponenten

vereinfachte Schnittzeichnung des Rotor-Pols

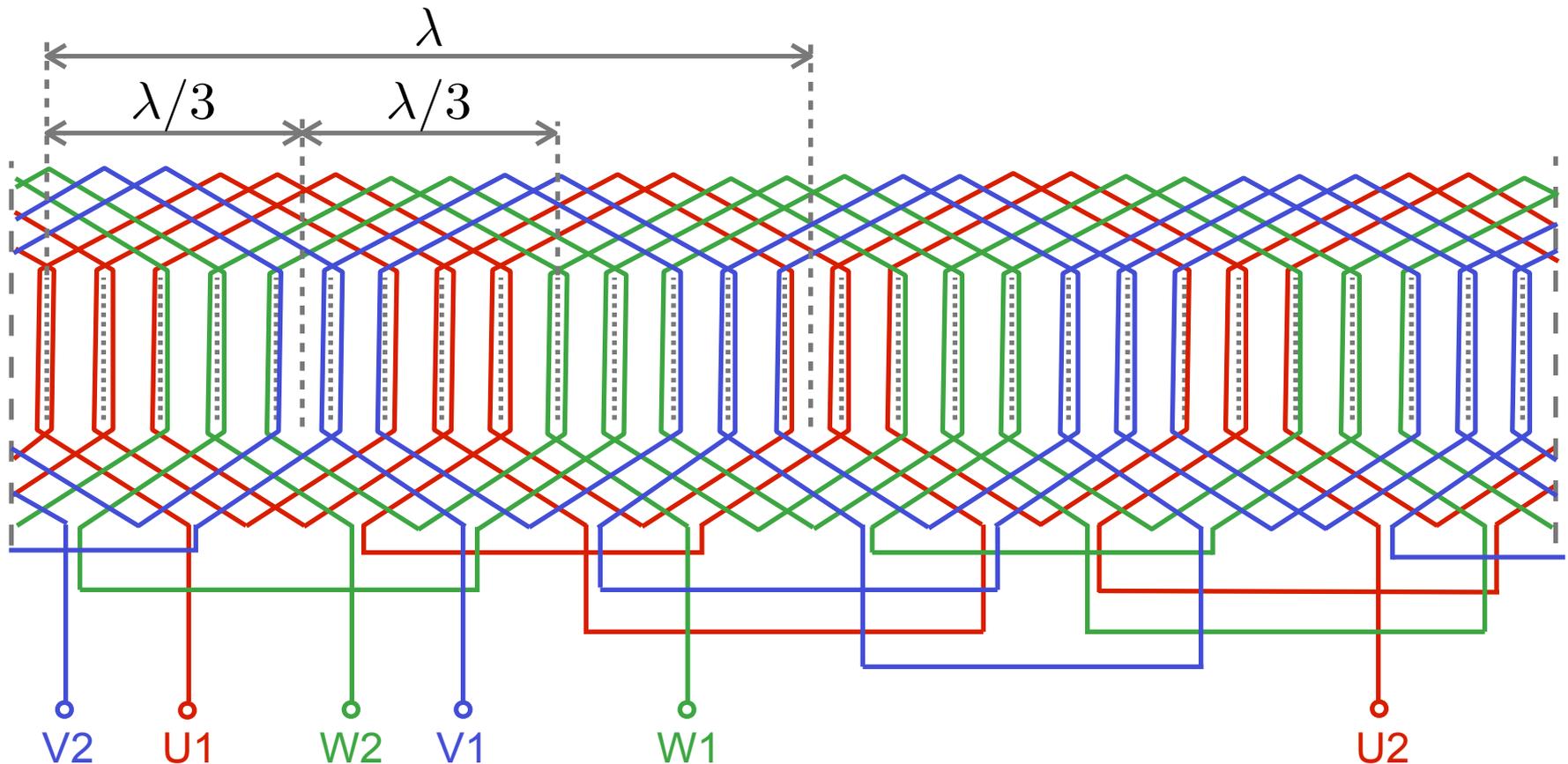


DIMENSIONIERUNG DER STATORWICKLUNG

Dimensionierung - Statorwicklung

Dreiphasen-Zweischichtwicklung

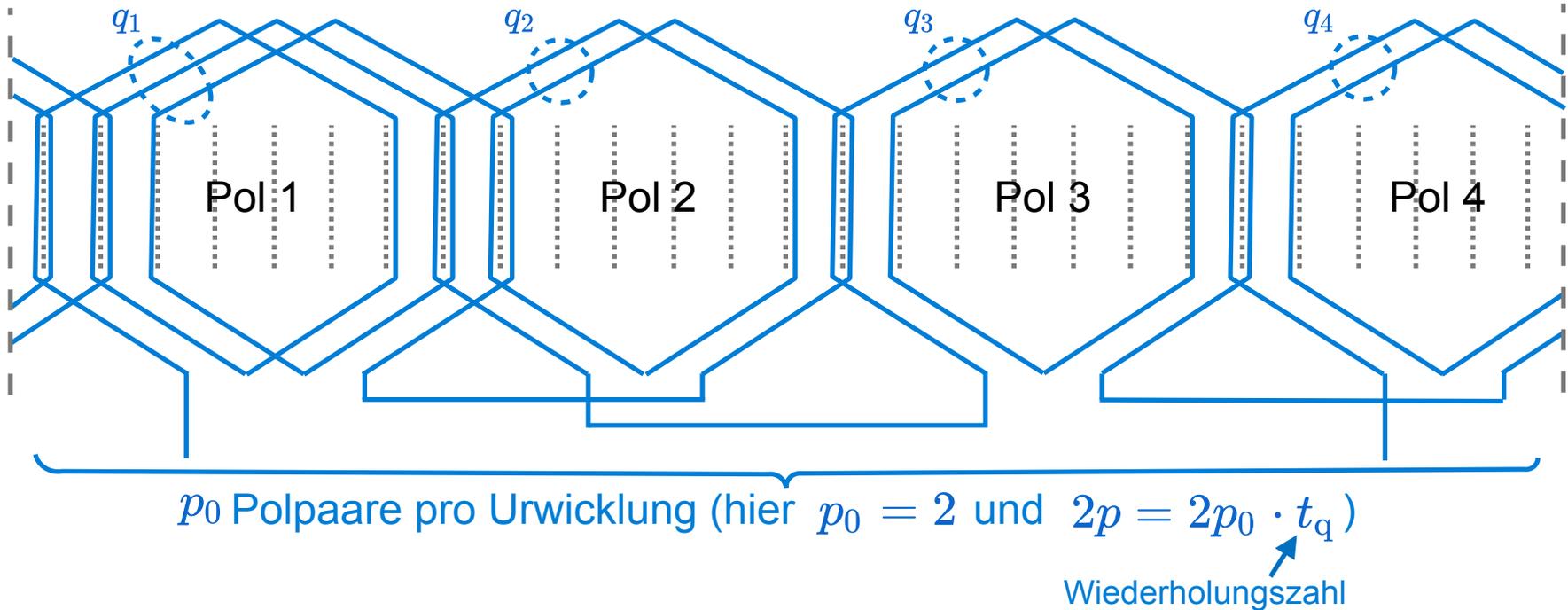
Darstellung einer Urwicklung (kleinste wiederholbare Wicklungseinheit):



Dimensionierung - Statorwicklung

Anzahl Nuten pro Pol und Phase (Bruchlochwicklung)

Darstellung einer Phase einer Urwicklung (kleinste wiederholbare Wicklungseinheit):



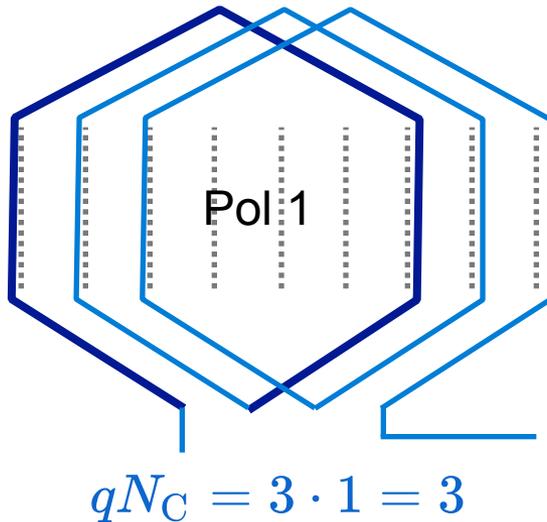
mittlere Anzahl Nuten
pro Pol und Phase:

$$q = \frac{q_Z}{q_N} \quad q = \frac{q_1 + q_2 + q_3 + q_4}{4} = \frac{3 + 2 + 2 + 2}{4} = \frac{9}{4}$$

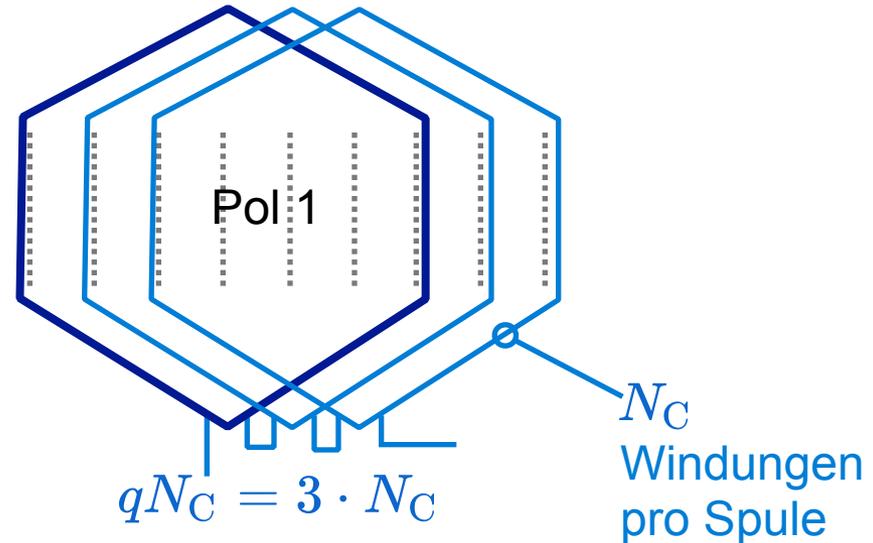
Dimensionierung - Statorwicklung

Statorwicklungs-Parameter einer Dreiphasenwicklung

Stabwicklung $N_C = 1$:



Spulenwicklung $N_C > 1$:



mittlere Anzahl Nuten
pro Pol und Phase:

$$q = \frac{qz}{q_N}$$

Windungen pro Pol:

$$qN_C$$

↑
Windungen pro Spule

Windungen pro Phase
bei Serienschaltung:

$$2pqN_C$$

Dimensionierung - Statorwicklung

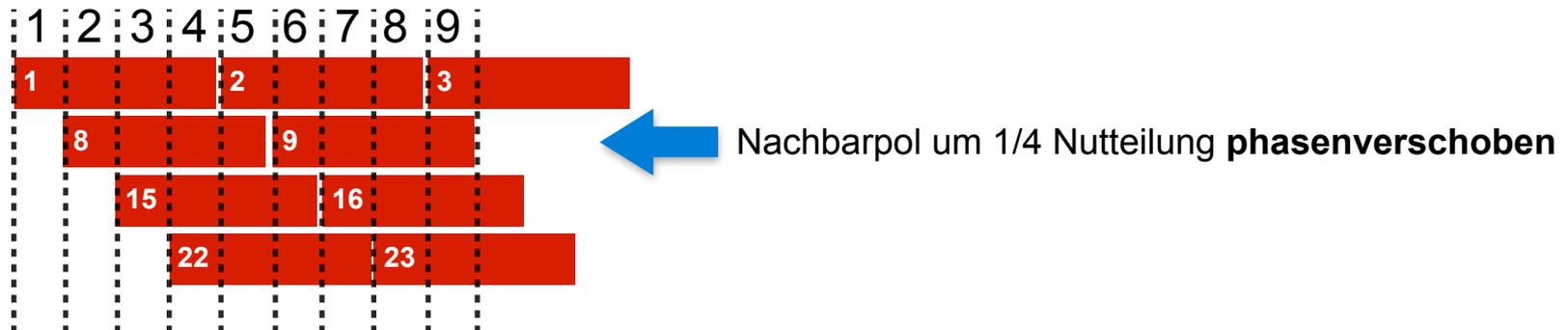
Bruchlochwicklung - Zonenplan

Zuordnung der einzelnen Phasen zu den Nuten einer Urwicklung:



Bei einer Bruchlochwicklung ist aufgrund der Phasenverschiebung der Zähler der Lochzahl (hier $q_Z = 9$) massgebend.

Damit wirkt die Bruchlochwicklung wie eine Ganzlochwicklung mit $q = 9$.

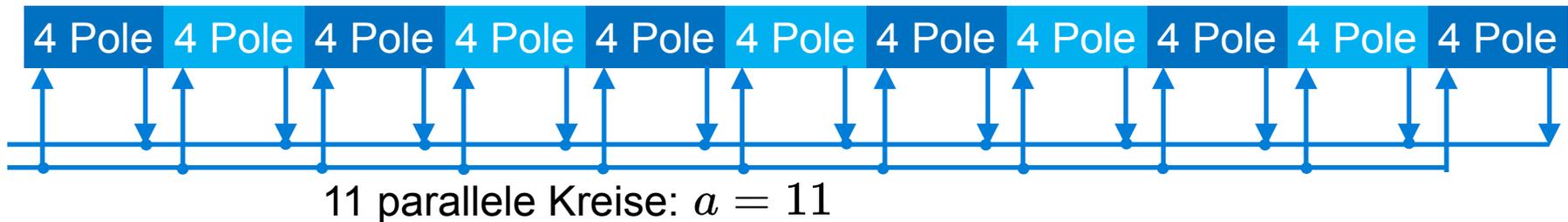


Dimensionierung - Statorwicklung

Bruchlochwicklung und Anzahl paralleler Kreise



Urwicklung über 4 Pole ($q_N = 4$) - Urwicklung wiederholt sich 11 mal:



Windungen pro Phase bei
Serienschaltung:

$$N_s = 2pqN_C$$

Windungen pro Phase und Kreis:

$$N_s = \frac{2pqN_C}{a}$$

Dimensionierung - Statorwicklung

Bruchlochwicklung - Zusammenfassung

- **Nachteil** von Bruchlochwicklungen:
 - Felderregengerkurve ist nicht abszissensymmetrisch:
Auftreten von geradzahligen Harmonischen möglich: $\nu = 1 + mg$
 $g = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$
 $\nu = +1, -2, +4, -5, +7, -8, +10, -11, +13$
 - Auftreten von Subharmonischen - eventuell starke Schwingungen
- **Vorteil** von Bruchlochwicklungen:
 - für den Zonenfaktor wirkt der mittlere Zähler (hier $q_Z = 9$), weil die Nuten an den Nachbarpolen phasenverschoben sind
 - Wicklungsfaktoren werden mit q_Z berechnet, und wirken damit wie eine Ganzlochwicklung mit $q = q_Z$

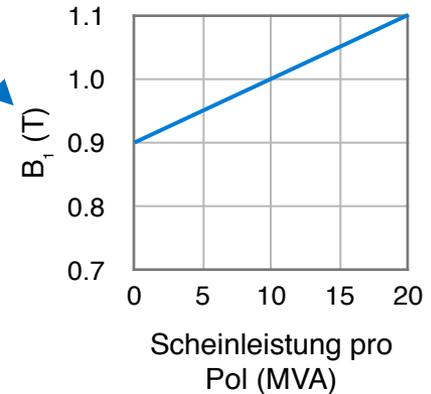
Dimensionierung - Statorwicklung

notwendige Anzahl der Windungen in Serie

$$U_P = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \cdot \xi_1 \cdot N_s \cdot \frac{2}{\pi} L \tau_P B_1$$

$$U_P = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

$$\xi_1 \approx 0.92$$



$$N_s = \frac{U_N}{\sqrt{3/2} \cdot 2\pi f \cdot \xi_1 \cdot (2/\pi) \cdot L \cdot \tau_P \cdot B_1}$$

theoretische Anzahl
Nuten pro Pol und Phase:

$$q = \frac{aN_s}{N_C 2p}$$

bekannt

gewählt

unbekannt

Dimensionierung - Statorwicklung

mögliche Lochzahlen

- Aufbau einer Tabelle für verschiedene:
 - Anzahl paralleler Kreise a
 - Anzahl Windungen pro Spule N_C
(Stabwicklung $N_C = 1$)
- Berechnung der Lochzahl unter Berücksichtigung der Symmetriebedingungen:

$$q = \frac{aN_s}{N_C 2p}$$

- Auswahl einer passenden Variante unter Berücksichtigung der Nutteilung $\tau_N \rightarrow$ Pulsationsverluste, HV-Wicklung, Kosten

Dimensionierung - Statorwicklung

Beispiel - Wicklung eines 150 MVA / 13.8 kV Generators

- Nenn-Scheinleistung $S_N = 150\,000\text{ kVA}$
- Frequenz $f = 50\text{ Hz}$
- Nennspannung $U_N = 13\,800\text{ V}$
- Polzahl $2p = 40$
- Stator-Innendurchmesser $D = 8\,900\text{ mm} \rightarrow \tau_P = \frac{D\pi}{2p} = 0.699\text{ m}$
- Stator-Eisenlänge $L = 1\,490\text{ mm}$
- magnetische Flussdichte $B_1 = 0.93\text{ T}$
- Wicklungstyp Roebelstabwicklung ($N_C = 1$)
- Anzahl Windungen:

$$N_s = \frac{U_N}{\sqrt{3/2} \cdot 2\pi f \cdot \xi_1 \cdot (2/\pi) \cdot L \cdot \tau_P \cdot B_1} \approx 63$$

$\xi_1 \approx 0.92$

Dimensionierung - Statorwicklung

Beispiel - mögliche Wicklungsvarianten (Stabwicklung)

$$N_C = 1, N_s = 63 \quad \rightarrow \quad q = \frac{aN_s}{N_C 2p} = 1.575 \cdot a$$

parallele Kreise a	Lochzahl q (theoretisch)	q_z	q_N	Lochzahl q	Anzahl Nuten Q	Nutteilung τ_s (mm)
1	1.575	8	5	1.600	192	145.6
2	3.150	16	5	3.200	384	72.8
4	6.300	32	5	6.400	768	36.4
5	7.875	63	8	7.875	945	29.6
8	12.600	63	5	12.600	1'512	18.5
10	15.750	63	4	15.750	1'890	14.8
20	31.500	63	2	31.500	3'780	7.4
40	63.000	63	1	63.000	7'560	3.7

→ Pulsationsverluste !

→ Kosten !

Nutteilung zu klein für eine Hochspannungswicklung

Dimensionierung basiert auf wichtigen physikalischen Zusammenhängen!

Dimensionierung - Statorwicklung

Computer-Implementierung der Statorwicklung

Stator winding data

fractional slot number 3.9000 = 39 / 10 $p_0 = 5$ $Q_0 = 117$

winding pitch coefficient 0.8547 $Y_1 = 10$ $\xi = 0.9302$

MMF table

v	φ (°)	ξ
-1	-129.2	-0.00577
+2	-101.5	0.02158
-4	-156.9	-0.01382
+5	106.2	0.93019
-7	175.4	-0.01277
+8	133.8	0.03262
-10	147.7	-0.00565
+11	161.5	0.00392
-13	-60.0	-0.00467
+14	9.2	0.00894
-16	-87.7	-0.01498
+17	36.9	0.01315
-19	-115.4	-0.02173
+20	64.6	0.01016
-22	-143.1	-0.01865
+23	92.3	0.00148
-25	-170.8	-0.07961
+26	-60.0	0.01076
-28	161.5	-0.03189
+29	-32.3	0.02446
-31	133.8	-0.01750
+32	-4.6	0.04190
-34	106.2	-0.00434
+35	-156.9	0.00367

Possible winding variants

turns	circuits	q_1	q_2	q	slots	τ (mm)
1	1	39	20	1.9500	117	139.6
1	2	39	10	3.9000	234	69.8
1	4	39	5	7.8000	468	34.9
1	5	39	4	9.7500	585	27.9
1	10	39	2	19.5000	1'170	14.0
1	20	39	1	39.0000	2'340	7.0

Stator Winding

voltage (V) 10500.0

flux density (T) 1.026

slot pitch (mm) 69.81

winding pitch 10

conductors 1

slots 234

circuits 2

layers double layer

$q = q_1 / q_2$ 3.9000 39 / 10

ξ 0.9302

Core Packages and Yoke

duct number 24

duct (mm) 6.0

stacking factor 0.94

package (mm) 50.6

flux density (T) 1.297

yoke h. (mm) 246.0

Daten der Urwicklung

Arbeitswelle der Bruchloch-Wicklung

$$\xi_{\nu=p_0}$$

Tabelle der möglichen Wicklungsvarianten

interaktive Wahl von Klemmenspannung, Flussdichte, Nutteilung und Wicklungsschritt

Berechnung der Wicklungsdaten

Harmonische der Felderreggerkurve (FEK) und Wicklungsfaktoren

EINLEITUNG

Computerunterstützung

Berechnung von Hydrogeneratoren

DIMENSIONIERUNG

Komponenten

Dimensionierung der Statorwicklung

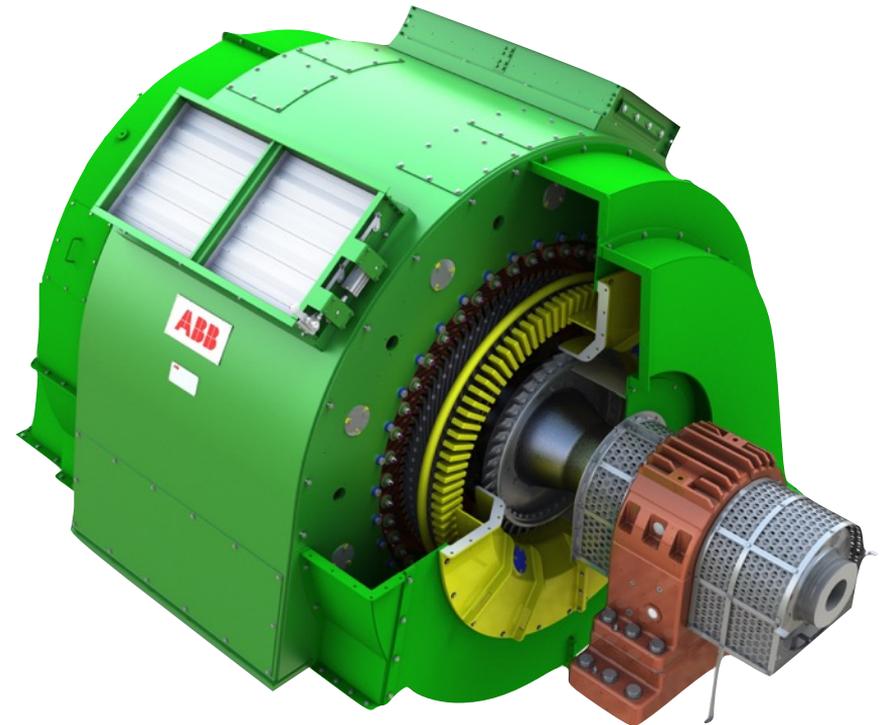
ELEKTRISCHE BERECHNUNGEN

Übersicht

Polschuh-Oberflächenverluste

OPTIMIERUNG

ZUSAMMENFASSUNG



Quelle: ANDRITZ Hydro

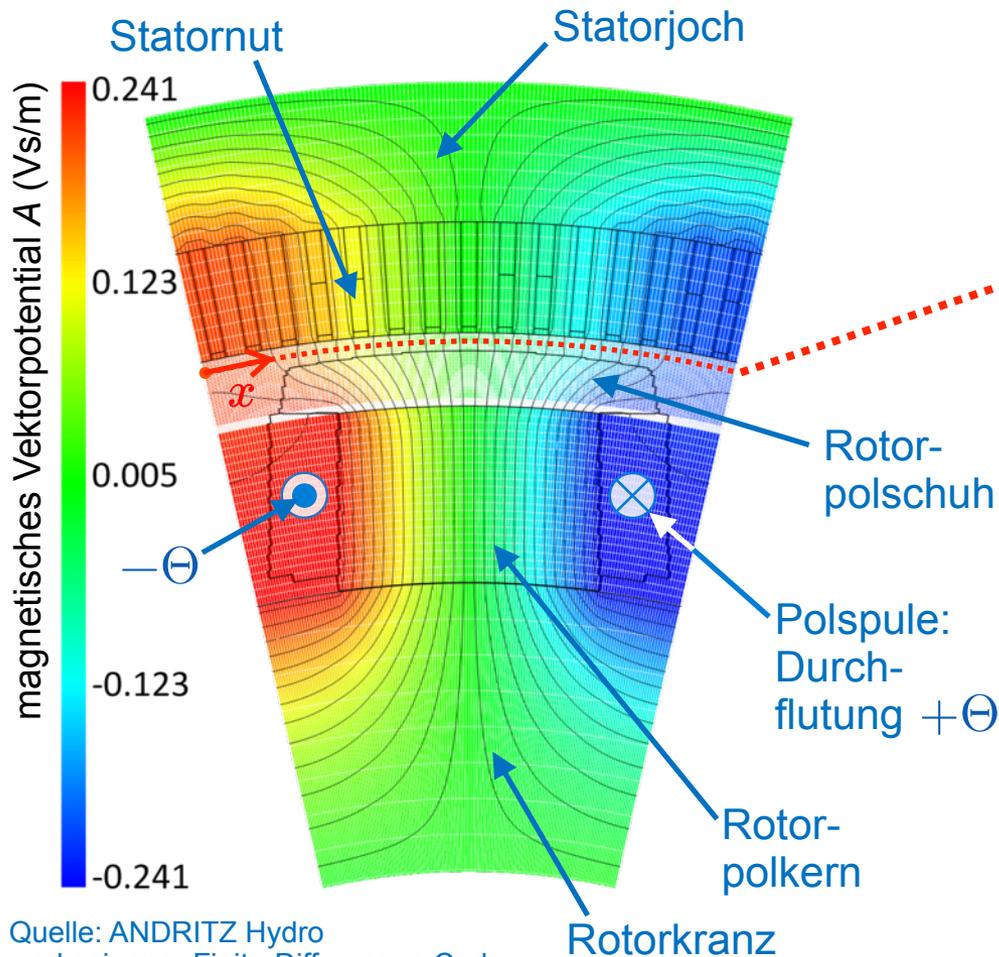


ÜBERSICHT ÜBER ELEKTRISCHE BERECHNUNGEN

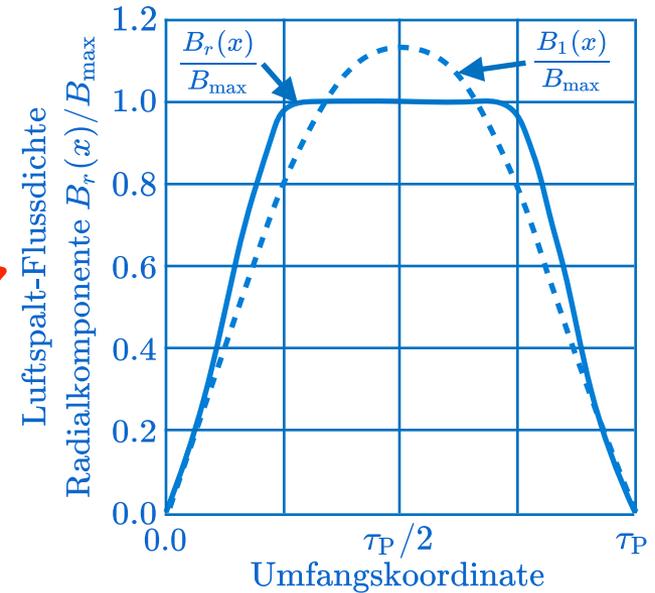


Elektrische Berechnungen - Übersicht

Polfeld und Polfeld-Koeffizienten



Quelle: ANDRITZ Hydro
werkseigener Finite-Differenzen Code



Polfeld-Koeffizienten:

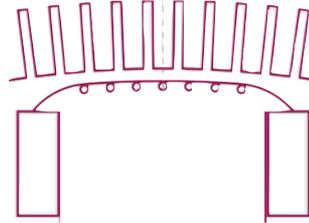
$$C_1 = \frac{B_1}{B_{\max}}$$

$$\alpha_i = \frac{1}{\tau_P} \int_0^{\tau_P} \frac{B_r(x)}{B_{\max}} dx$$

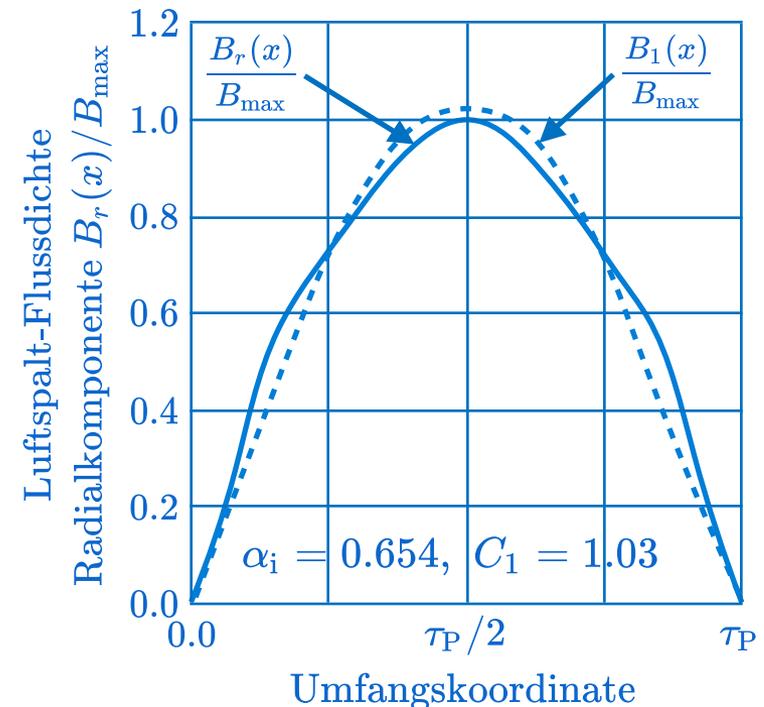
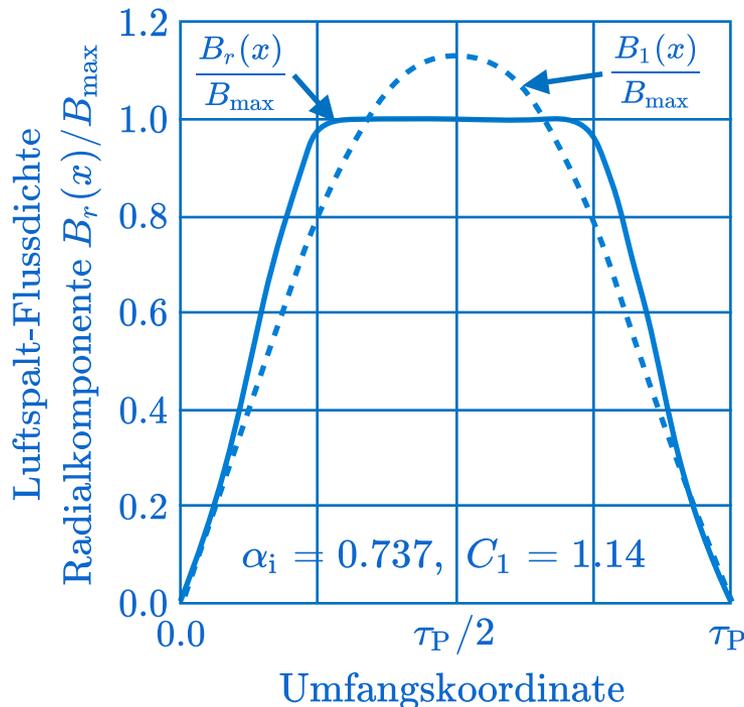
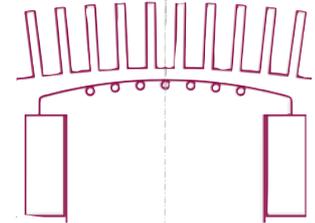
Elektrische Berechnungen - Übersicht

abgeflachter Pol \leftrightarrow Sinusfeldpol

abgeflachter Pol:
niedriger Erregerbedarf,
hoher Oberwellengehalt
(Eisenverluste)



Sinusfeldpol:
hoher Erregerbedarf,
geringer Oberwellengehalt



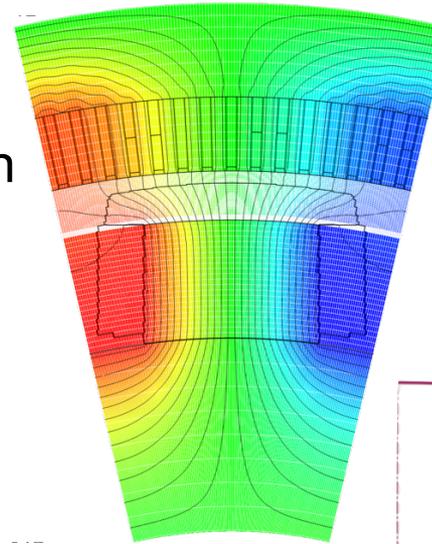
Elektrische Berechnungen - Übersicht

Bestimmung des Erregerbedarfs

- **numerische Berechnung:**

basierend auf einem nichtlinearen numerischen Modell

- Finite-Elemente (FE)
- Finite-Differenzen (FD)

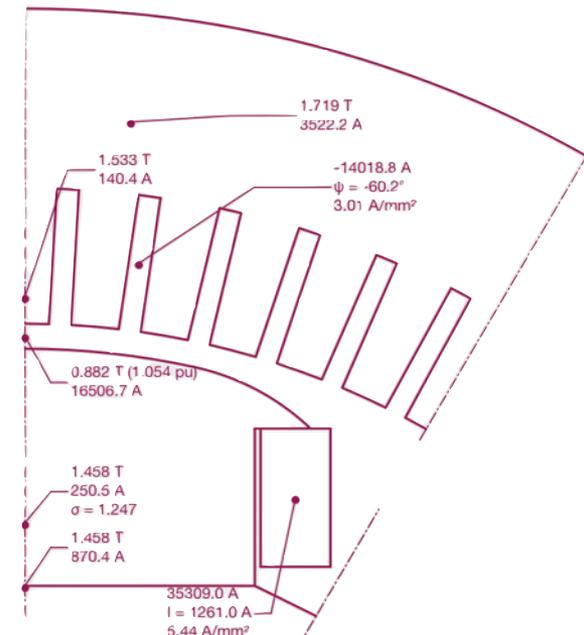


Quelle: ANDRITZ Hydro
werkseigener Finite-Differenzen Code

- **analytische Berechnung:**

basierend auf einer vereinfachten Berechnung des magnetischen Kreises

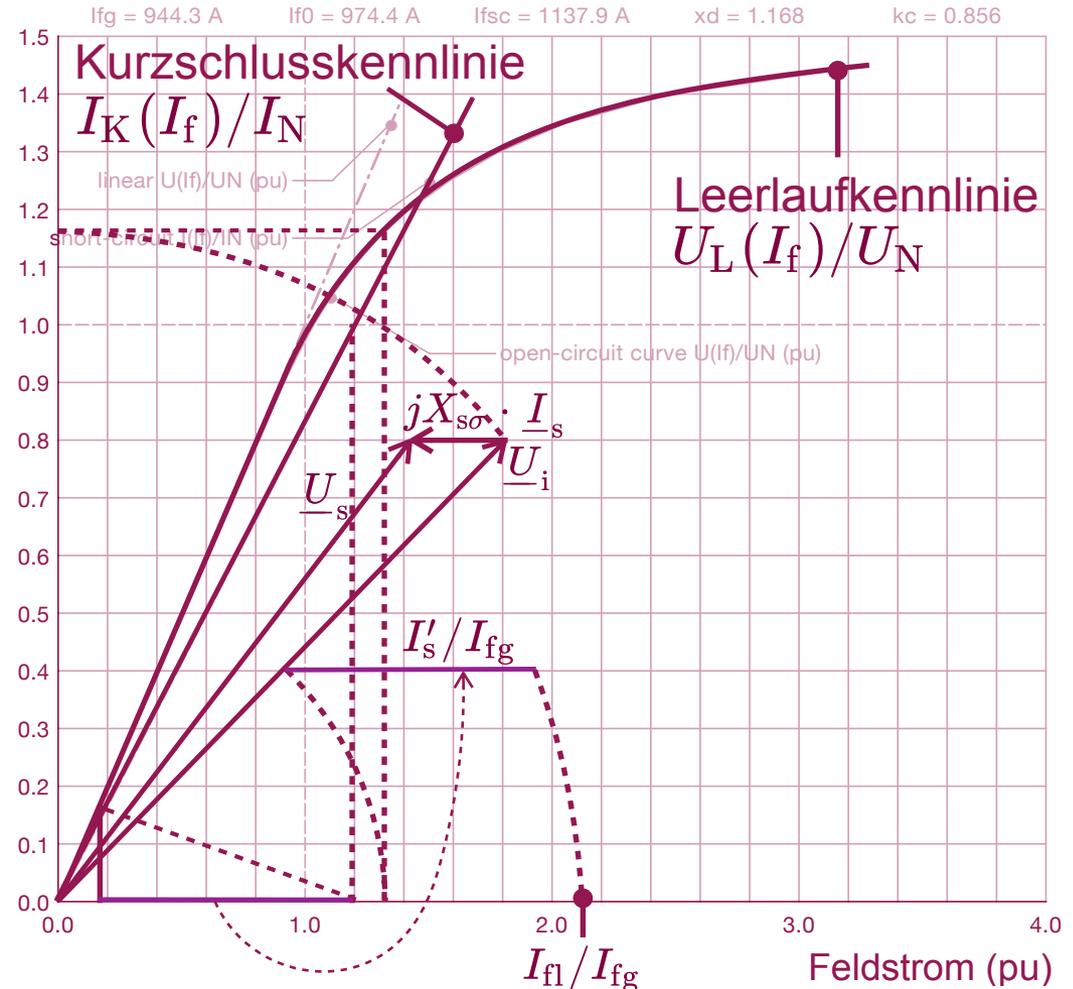
- schnelle Berechnung
- ausreichend genau



Elektrische Berechnungen - Übersicht

analytische Bestimmung des Erregerbedarfs

- analytische Bestimmung des Erregerbedarfs:
 - Verwendung der Polfeld-Koeffizienten aus einer numerischen Feldberechnung
 - analytische Ermittlung des Erregerbedarfs über eine vereinfachte Berechnung des magnetischen Kreises



Elektrische Berechnungen - Übersicht

Verlustberechnung und Wirkungsgrad

- **mechanische Verluste (ca. 20...40% der Gesamtverluste):**
 - Ventilationsverluste
 - Lagerreibungsverluste
- **Ummagnetisierungsverluste (ca. 20...40% der Gesamtverluste):**
 - Hysterese-, klassische und anomale Wirbelstromverluste im Stator-Blechpaket
 - Wirbelstromverluste an der Polschuhoberfläche aufgrund der Stator-Nutung und der Feldoberwellen der Statorwicklung
 - Wirbelstromverluste im Presssystem des Stator-Blechpakets (stirnseitig: Pressfinger, Pressplatten)
 - Wirbelstromverluste in Gehäuseteilen und Verschaltungen

Elektrische Berechnungen - Übersicht

Verlustberechnung und Wirkungsgrad

- **Verluste in der Statorwicklung (ca. 15...30% der Gesamtverluste):**
 - Stromwärmeverluste
 - Wirbelstromverluste aufgrund des magnetischen Streufelds in der Statornut und im Wickelkopf (Tangential- und Radialanteil)
 - Schlingstromverluste aufgrund von Kreisströmen zwischen den parallelen Teilleitern eines Wicklungsstabes aufgrund des Stirnstreufelds
- **Verluste in der Dämpferwicklung** aufgrund der Stator-Nutung und der Feldoberwellen der Statorwicklung **(ca. 0...3% der Gesamtverluste)**
- **Stromwärmeverluste in der Polwicklung (ca. 10...25% der Gesamtverluste)**

Elektrische Berechnungen - Übersicht

Verlustberechnung und Wirkungsgrad

- hoher **Berechnungsaufwand** bei der Bestimmung der Verluste
- **hohe Verlustbewertungen** von Seiten der Auftraggeber:

Beispiel (100 MVA-Generator):

Verlustbewertung 12 000 EUR/kW
 Polschuh-Verluste 14 kW (1.2 %) ←
 bewertet **168 000 EUR**

Bereits kleine Verlustanteile sind hoch bewertet !

Operation: $U = 10950.0 \text{ V}$, $I = 5272.6 \text{ A}$,
 $\cos \phi = -0.8$, $\sin \phi = 0.6$

Mechanical Losses

ventilation	301.9 kW
bearing	59.4 kW
	<u>361.2 kW</u>

Open circuit core losses

iron (yoke)	93.9 kW
iron (teeth)	51.4 kW
pole face	0.4 kW
other	14.5 kW
	<u>160.2 kW</u>

Short circuit test losses

I^2R stator	213.5 kW
eddy current	20.7 kW
pole face	13.7 kW
stator iron (yoke)	12.6 kW
stator iron (teeth)	5.1 kW
other	125.5 kW
	<u>391.2 kW</u>

Excitation losses

I^2R rotor	248.0 kW
--------------	----------

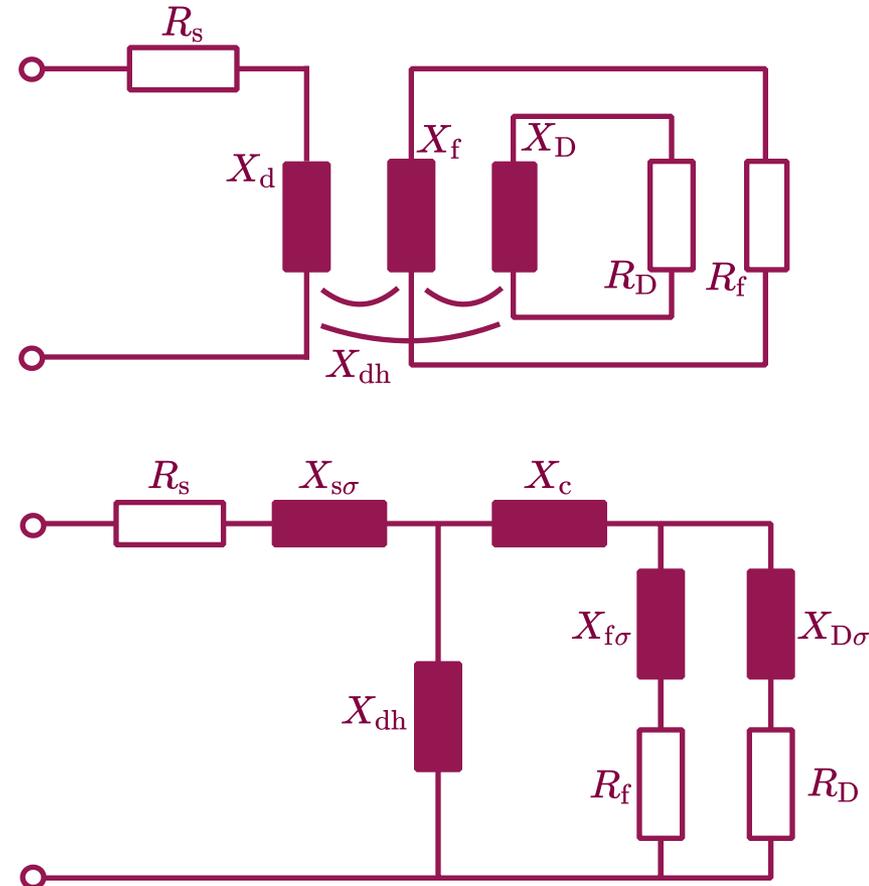
Loss calculation summary

total losses	1185.4 kW
efficiency	98.54 %

Elektrische Berechnungen - Übersicht

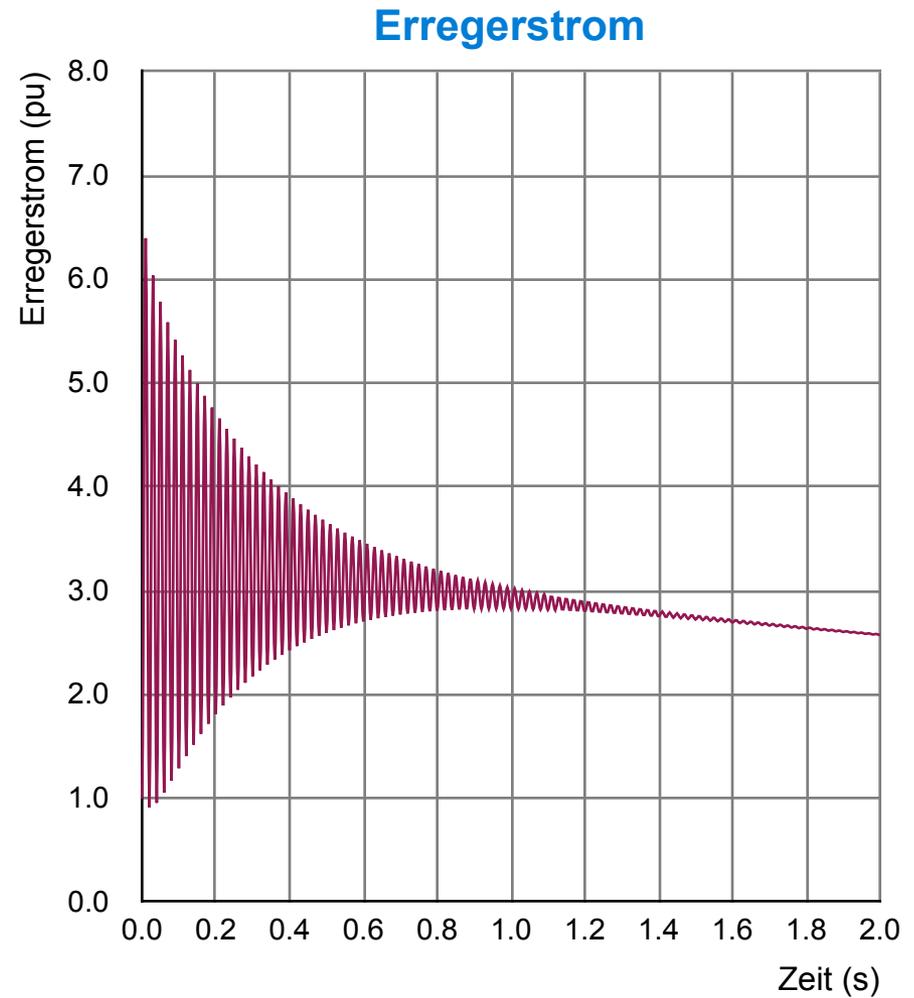
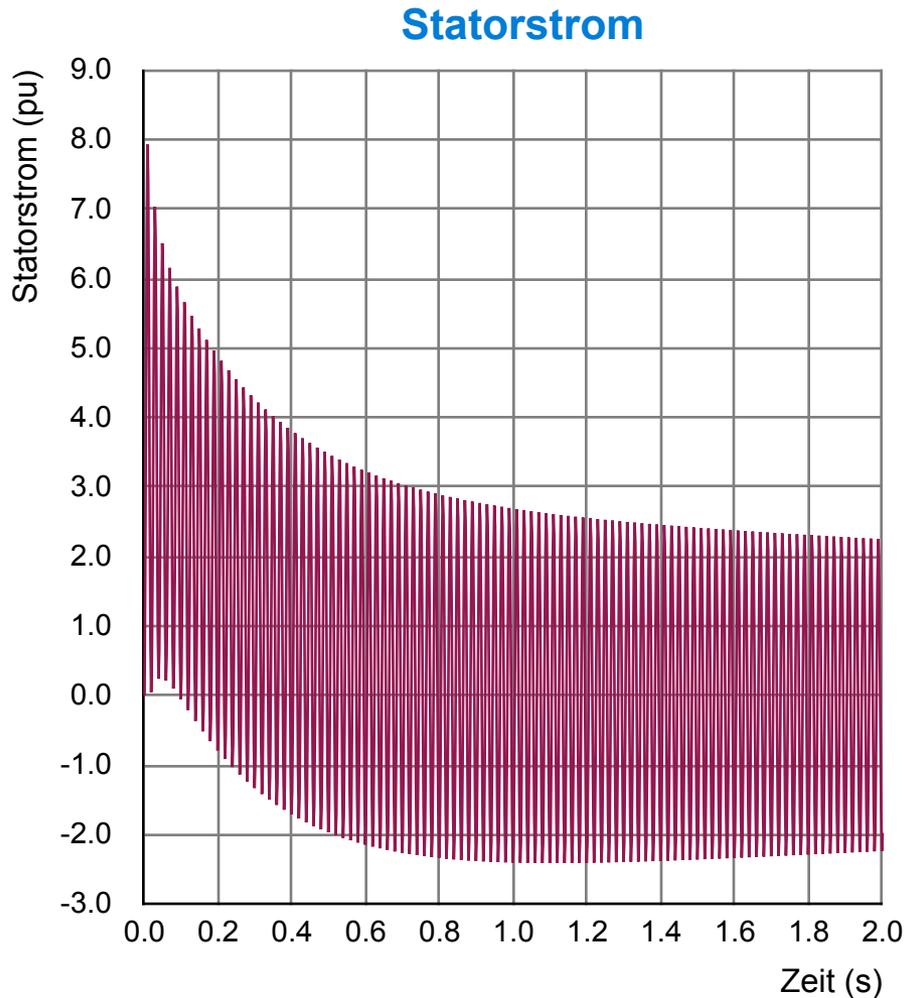
Ersatzschaltbild für transiente Vorgänge

- **stationärer** Betrieb:
 - Erregerwicklung induziert Spannung in der Statorwicklung
 - keine Gegeninduktion der Statorwicklung auf Rotorkreise
- **transienter** Vorgang - Koppelung von drei elektrischen Kreisen:
 - Statorwicklung
 - Erregerwicklung (Feldwicklung)
 - Dämpferwicklung
- Bestimmung des **Ersatzschaltbilds**



Elektrische Berechnungen - Übersicht

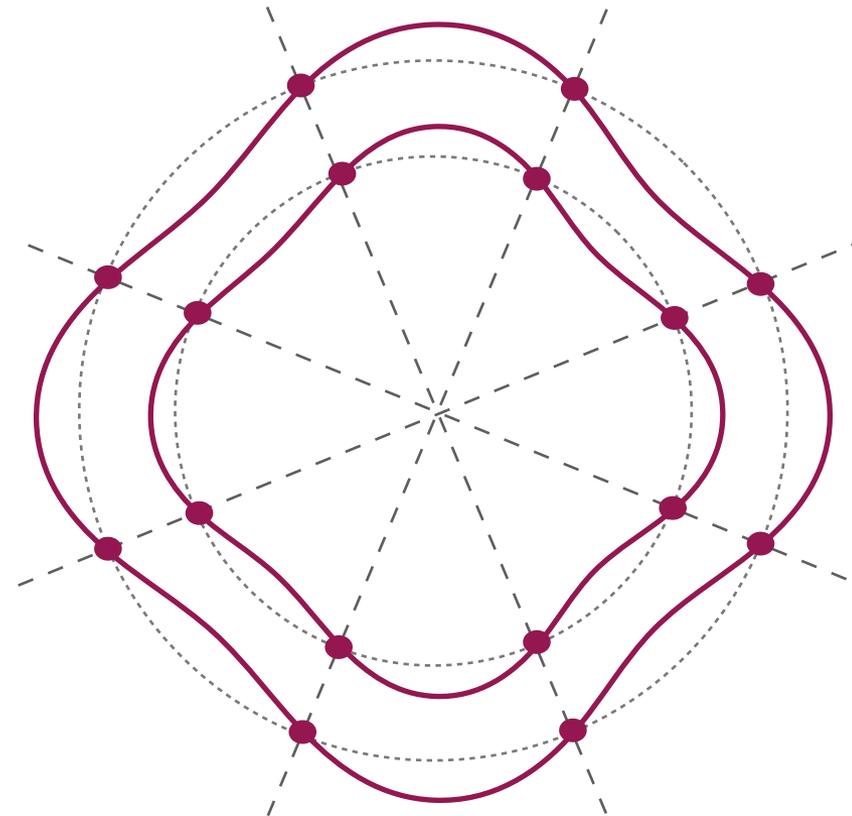
Beispiel: dreiphasiger Stosskurzschluss aus ESB



Elektrische Berechnungen - Übersicht

magnetische Kräfte

- **Radialkraftwellen** aufgrund von Nutungseffekten (offene Statornut) und der Bruchlochwicklung
- Anregung nahe der Eigenfrequenzen des Stators kann zu **unzulässigen Schwingungsamplituden** führen



RADIALKRAFTWELLEN

Elektrische Berechnungen - Radialkraftwellen

Schwingungsproblem eines 250 MVA - Generators

- bestehende Maschine mit Schwingungsproblem

$$S_N = 250 \text{ MVA}$$

$$2p = 14$$

$$D = 4.4 \text{ m}$$

$$L = 2.9 \text{ m}$$

- begrenzte Anzahl Maschinendaten vorhanden (Längsschnitt, Querschnitt)

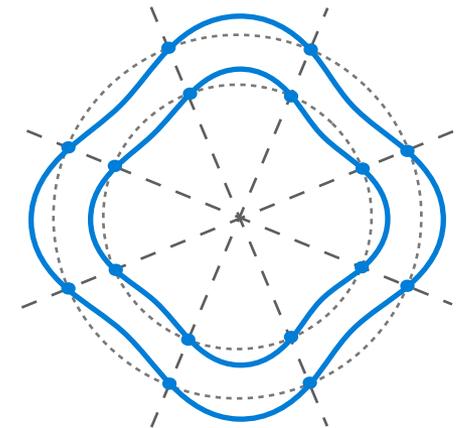
- Computerprogramm ergänzt fehlende Daten

- **Identifikation des Problems in wenigen Minuten:**

8-Knotenschwingung des Stators

Anregung durch Bruchlochwicklung mit 100 Hz

Eigenfrequenz des Stators nahe 100 Hz

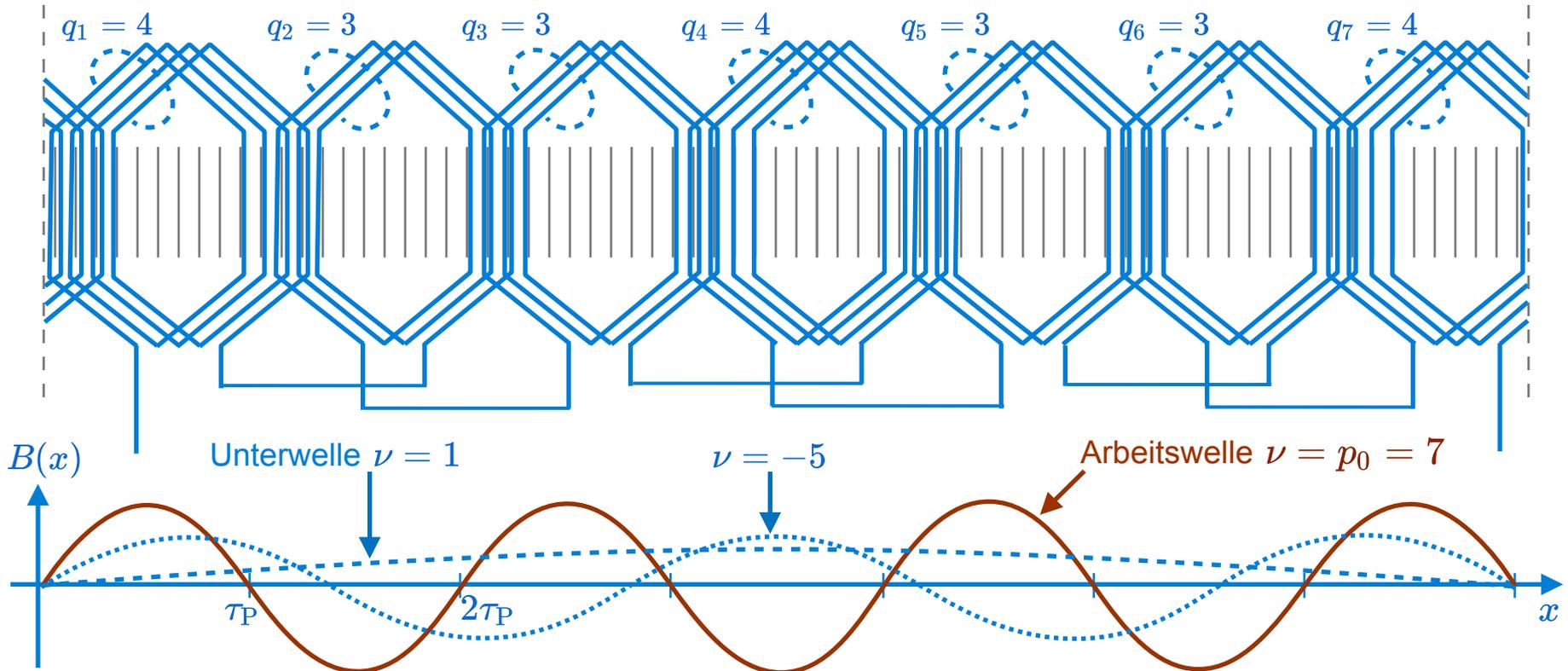


Wichtige physikalische Zusammenhänge sind im Computer programmiert!

Elektrische Berechnungen - Radialkraftwellen

Bruchlochwicklung des Generators

Darstellung einer halben Urwicklung der Bruchlochwicklung ($p_0 = 7$):



mittlere Anzahl Nuten
pro Pol und Phase:

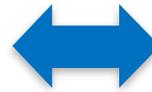
$$q = \frac{4 + 3 + 3 + 4 + 3 + 3 + 4}{7} = \frac{24}{7} = \frac{q_Z}{q_N}$$

Elektrische Berechnungen - Radialkraftwellen

Entstehung der Radialkraftwellen

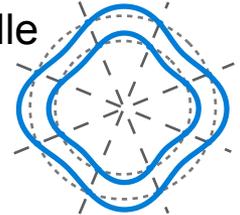
Radikalkomponente der Magnetfeldwelle
der Ankerrückwirkung

$$B_S(x, t) = \sum_{\nu \in 1+mg}^{\infty} \hat{B}_{\nu} \cdot \sin\left(\frac{\nu x \pi}{\tau_P p_0} + \varphi_{\nu} - \omega t\right)$$



mechanische Spannungswelle

$$\sigma \approx \frac{B_r^2}{2\mu_0}$$



Zusammenwirken zweier Wellen der Ordnungszahlen ν_1 und ν_2 ergibt ein Wellenpaar:

$$\sin\left(\frac{\nu_1 x \pi}{\tau_P p_0} - \omega t\right) \cdot \sin\left(\frac{\nu_2 x \pi}{\tau_P p_0} - \omega t\right) = \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x \pi}{\tau_P p_0} \cdot (\nu_1 \pm \nu_2) - 2\omega t\right)$$

*Harmonische des Polfelds,
nichtkonstanter Luftspalt und
Einfluss der Dämpferwicklung
werden hier vernachlässigt !*

Knotenanzahl $N = \left| \frac{2p \cdot (\nu_1 \pm \nu_2)}{p_0} \right|$ $p_0 \uparrow \Rightarrow N \downarrow$

anregende Kreisfrequenz $\Omega = 2\omega$



$$(\dots + B_{\nu_1} + B_{\nu_2} + \dots)^2 = \dots B_{\nu_1}^2 + 2B_{\nu_1} B_{\nu_2} + B_{\nu_2}^2 + \dots$$

$$\hat{\sigma}_{\nu_1, \nu_2} = \frac{1}{2\mu_0} \cdot \hat{B}_{\nu_1} \hat{B}_{\nu_2}$$

Elektrische Berechnungen - Radialkraftwellen

Berechnungsergebnisse

berechnete Amplituden der Magnetfeldwellen der Ankerrückwirkung:

Ordnungszahl ν	B_ν (T)
1	0.035
-5	0.024
7	0.910
-11	0.027
13	0.008

Eigenfrequenz des Stators liegt für die 8-Knoten Form nahe bei 100 Hz !

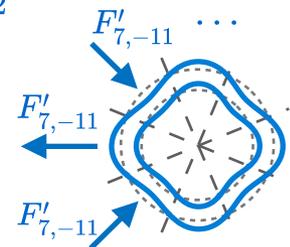
- zum Erreichen einer nennenswerten Amplitude muss die Arbeitswelle $\nu = 7$ involviert sein
- das Zusammenwirken von $\nu = 7$ und $\nu = -11$ führt zu einer 8-Knoten Spannungswelle

$$N = \left| \frac{2 \cdot 7 \cdot (7 + (-11))}{7} \right| = 8$$

$$\hat{\sigma}_{7,-11} = \frac{0.910 \cdot 0.027}{2\mu_0} = 9776 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

- die Zugkraft eines Wellenbergs pro Maschinenlänge beträgt

$$F'_{7,-11} = \hat{\sigma}_{7,-11} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \tau = 9776 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot 1.73 \text{ m} = 10754 \text{ N/m}$$





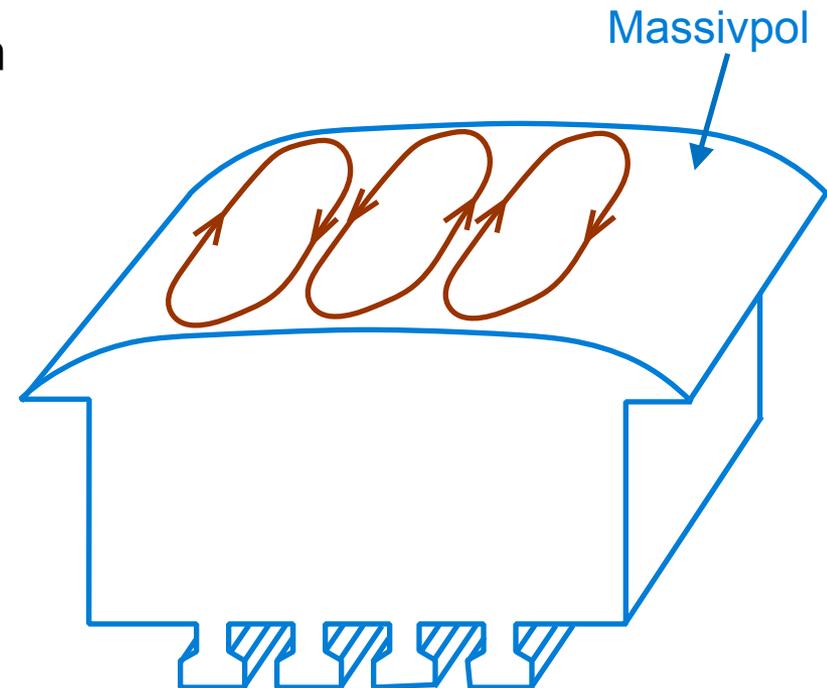
POLSCHUH- OBERFLÄCHENVERLUSTE ÜBERSICHT



Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Übersicht

- Magnetfeldwellen im Luftspalt, die sich relativ zum Rotor bewegen, induzieren Spannungen in Polschuh und Dämpferwicklung und führen zu axialem Stromfluss:
 - **Pulsations-Feldwellen** aufgrund der Stator-Nutung (Leerlauf)
 - Feldwellen aufgrund der **Harmonischen der Felderregerkurve** (Last)

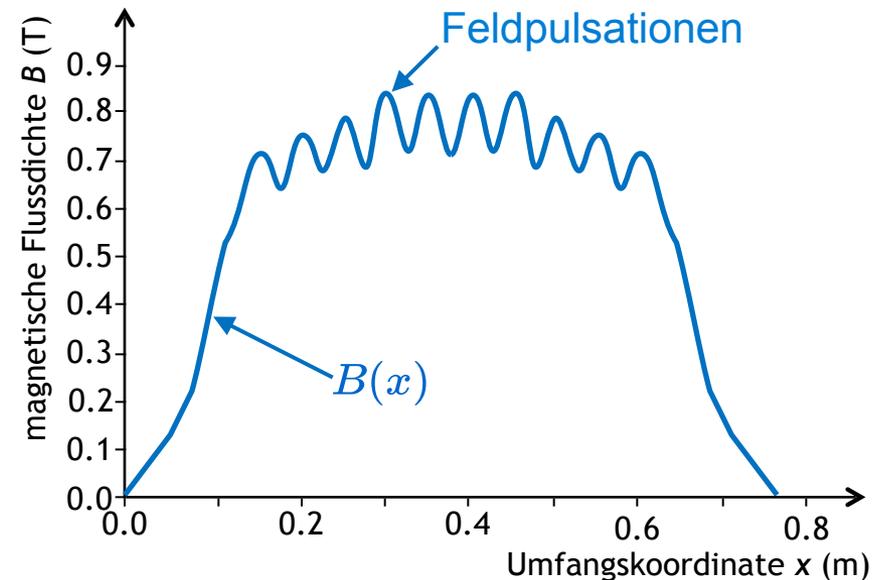
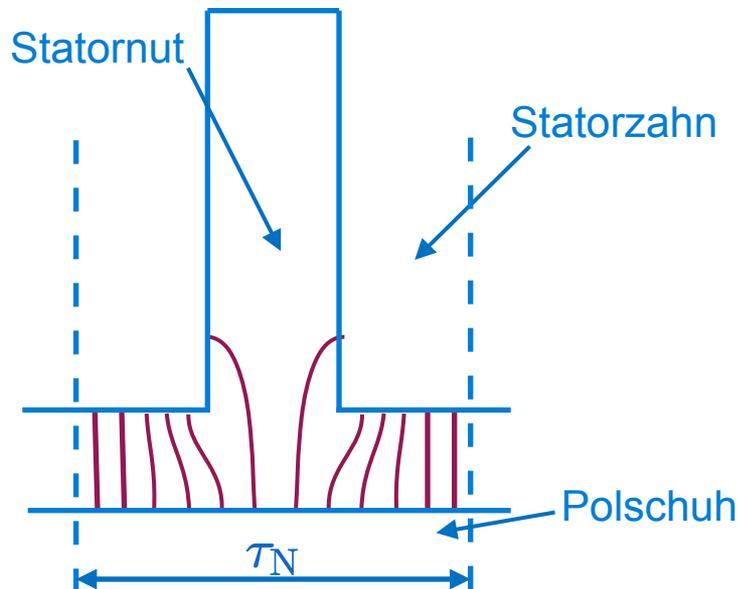


Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Feldpulsationen der Stator-Nutung

- Feldpulsationen aufgrund der **Stator-Nutung** (offene Nuten der Hochspannungswicklung)
- Wellenlänge: $\lambda = \tau_N$
- Frequenz: $f_Q = Q \cdot n = 2pmq \cdot \frac{f}{p} = 2mqf$

m ... Anzahl Phasen
 p ... Anzahl Polpaare der Maschine
 Q ... Anzahl Statornuten am Umfang
 q ... Anzahl Nuten pro Pol und Phase
 f ... Netzfrequenz (Hz)
 f_Q ... Pulsationsfrequenz (Hz)



Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Harmonische der Felderreggerkurve

- Harmonische der Felderreggerkurve der **Ankerrückwirkung**
- massgebender Anteil durch 5. und 7. Harmonische
- Felderreggerkurve (in rotorfestem Koordinatensystem):

$$V(\xi, t) = \frac{m}{2} \sum_{\nu \in 1+gm} V_\nu \sigma \sin \cdot \left(\frac{\nu \sigma \pi \xi}{\tau_p p_0} + \varphi_\nu \sigma - \omega t \cdot \left(1 - \frac{\nu \sigma}{p_0} \right) \right)$$

- Wellenlänge: $\lambda_\nu = \frac{2\tau_p p_0}{\nu \sigma}$
- Frequenz: $f_\nu = f \cdot \left(1 - \frac{\nu \sigma}{p_0} \right)$

m ... Anzahl Phasen

p_0 ... Anzahl Polpaare einer Urwicklung

σ ... Vorzeichenfaktor, +1 bzw. -1

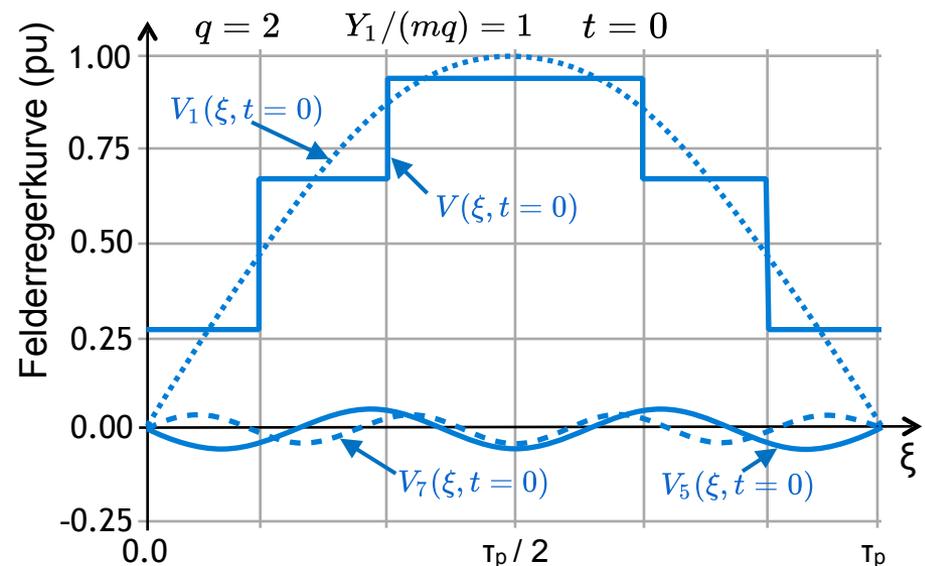
ν ... Ordnungszahl

V_ν ... Amplituden der Felderreggerkurve (A)

φ_ν ... Phasenwinkel (rad)

τ_p ... Polteilung (m)

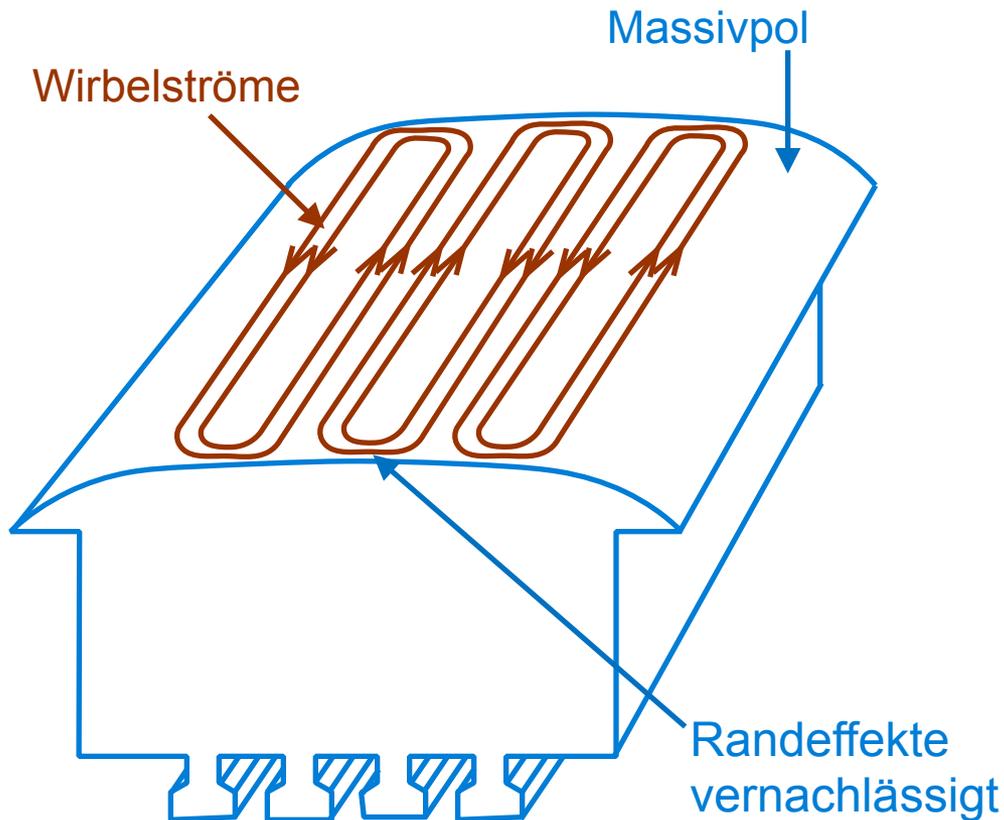
ω ... Kreisfrequenz (1/s), $\omega = 2\pi f$



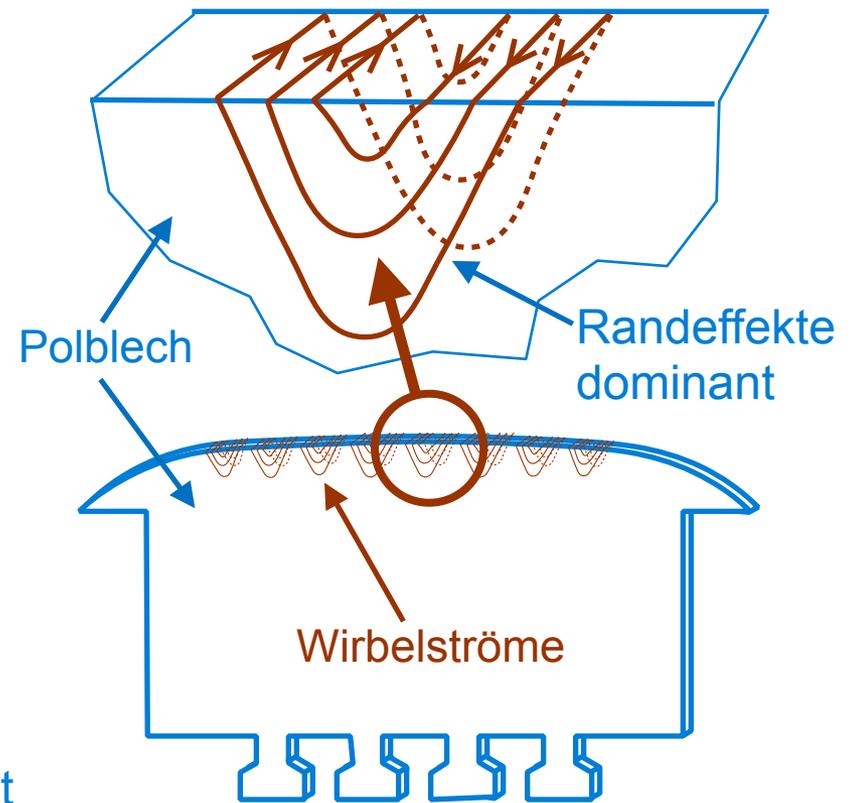
Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Massivpol \leftrightarrow lamellierter Pol

Massivpol:



lamellierter Pol:



POLSCHUH- OBERFLÄCHENVERLUSTE TEIL I: 2D-ALGORITHMUS

Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Rechenmodell für Massivpole - ebenes Feld

- **Ansatz:** zweidimensionales (ebenes) Feld in (x, y) -Ebene
- Berechnung des **magnetischen Vektorpotentials:**

$$\underline{\mathbf{A}}(x, y) = \underline{A}(x, y) \cdot \mathbf{e}_z$$

$$\underline{\mathbf{B}} = \nabla \times \underline{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \partial_y \underline{A} \\ -\partial_x \underline{A} \\ 0 \end{pmatrix}$$

- harmonische Zeitabhängigkeit **aller Feldgrößen**, somit Rechnung mit **komplexen Größen:**

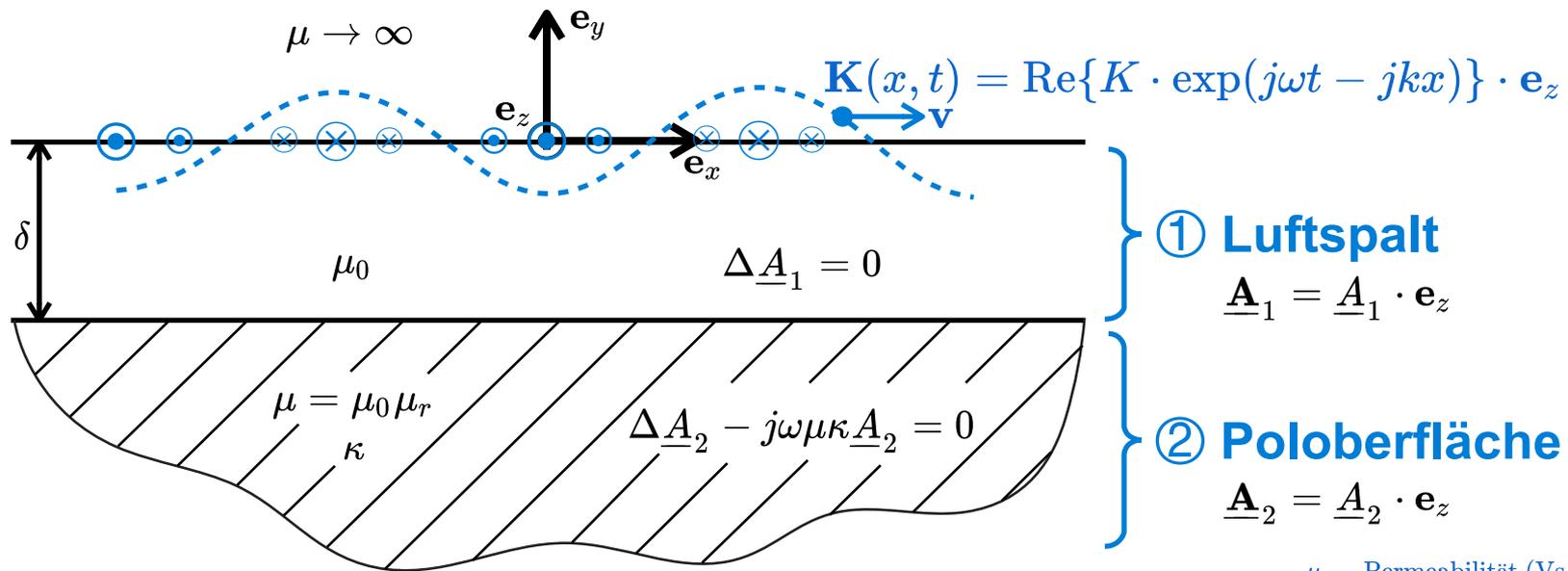
$$f(x, y, t) = \operatorname{Re} \left\{ \underline{f}(x, y) \cdot \exp(j\omega t) \right\}$$

A ... magnetisches Vektorpotential (Vs/m)
 B ... magnetische Flussdichte (T)

Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Rechenmodell für Massivpole - Übersicht

- Berechnung des **magnetischen Vektorpotentials** in zwei Bereichen:
Luftspalt und Poloberfläche
- Feldanregung über **Strombelags**-Welle: $\underline{K}(x) = K \cdot \exp(-jkx)$



A ... magnetisches Vektorpotential (Vs/m)
 B ... magnetische Flussdichte (T)
 K ... Strombelag (A/m)

μ ... Permeabilität (Vs/Am)
 κ ... elektrische Leitfähigkeit (S/m)
 ω ... anregende Kreisfrequenz (1/s)
 k ... Kreiswellenzahl (1/m)

Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Rechenmodell für Massivpole - Lösungsansätze

- alle Größen sind proportional $\exp(-jkx)$
- Lösungsansatz in der Poloberfläche (erfüllt *Helmholtz*-Gleichung):

$$\underline{A}_2(x, y) = \underline{D}_2 e^{\lambda y} \cdot \exp(-jkx)$$

- Lösung in der Poloberfläche:

$$\underline{\lambda} = \sqrt{k^2 + \frac{2j}{d_E^2}} \quad d_E = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\kappa}}$$
$$\underline{D}_2 = \frac{\mu_0 K}{k} \cdot \frac{e^{\underline{\lambda}\delta}}{\sinh(k\delta) + \frac{\underline{\lambda}}{\mu_r k} \cdot \cosh(k\delta)}$$

Literatur: M.G. Barello. *Courants de Foucault engendrés dans les pièces polaires massives des alternateurs par les champs tournants parasites de la rédaction d'induit. Revue Générale de l'électricité, pages 557-576, 1955.*

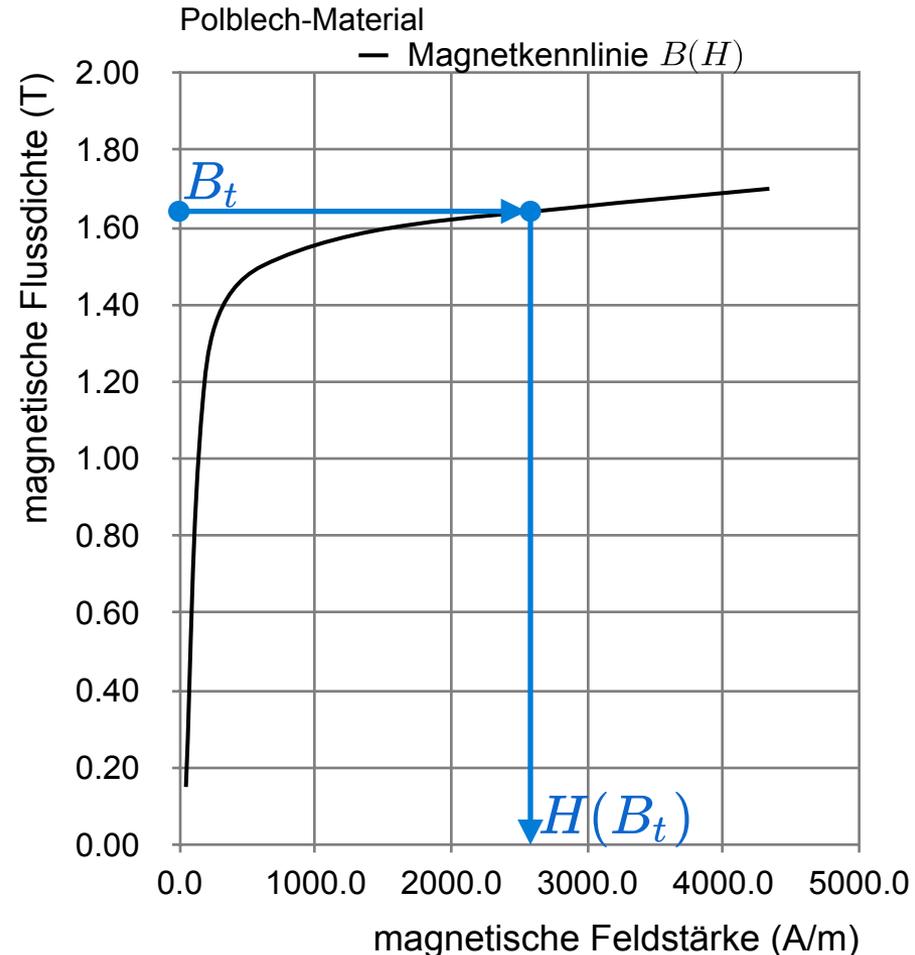
Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Berücksichtigung der Nichtlinearität

- **ortsabhängige Permeabilität**
kann nicht berücksichtigt werden
- konstante **Ersatzpermeabilität** im
gesamten Plattenbereich
- Bestimmung dieser Permeabilität
über die **Tangentialkomponente**
der magnetischen Flussdichte

$$B_t = \left| \frac{\mu_0 K}{k} \cdot \frac{\frac{\lambda}{\mu_r k}}{\sinh(k\delta) + \frac{\lambda}{\mu_r k} \cosh(k\delta)} \right|$$

$$\mu_{r2} = \frac{B_t}{\mu_0 H(B_t)}$$



Quelle: voestalpine ISOVAC (Datenblätter)

Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

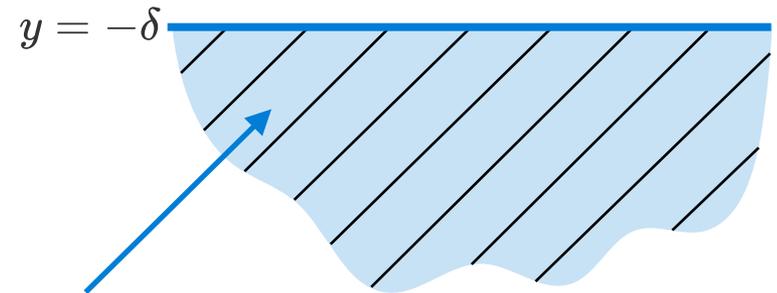
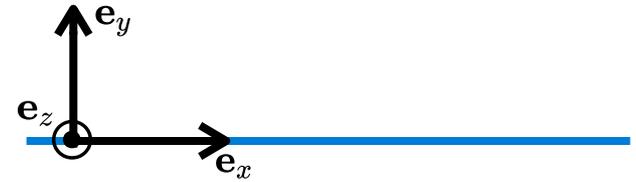
Berechnung der Oberflächen-Verlustleistungsdichte

- Verlustleistungsdichte im Plattenmaterial:

$$p_V = \frac{\omega^2 \kappa}{2} \cdot \underline{A}_2 \underline{A}_2^*$$

- Oberflächen-Verlustleistungsdichte:

$$p_A = \int_{-\infty}^{-\delta} \frac{\omega^2 \kappa}{2} \cdot \underline{A}_2 \underline{A}_2^* dy = \frac{\omega^2 \kappa}{2} \frac{\underline{D}_2 \underline{D}_2^*}{\underline{\lambda} + \underline{\lambda}^*} \cdot e^{-(\underline{\lambda} + \underline{\lambda}^*) \cdot \delta}$$



Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

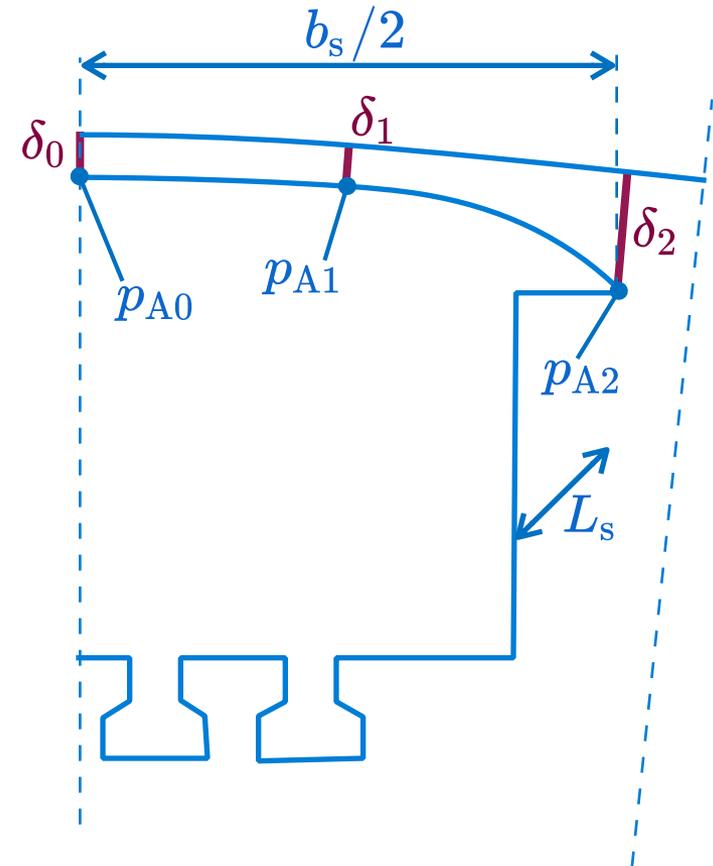
Berechnung der Gesamtverluste

- **Voraussetzungen:**
 - Verluste werden an mehreren Stellen des Polschuhs separat berechnet
 - Randeffekte an der Kante des Polschuhs und den axialen Enden werden vernachlässigt
- **mittlere Verlustleistungsdichte:**

$$\bar{p}_A = \frac{p_{A0} + 4p_{A1} + p_{A2}}{6}$$

- **Gesamtverluste:**

$$P = \bar{p}_A \cdot b_s L_s \cdot 2p$$





POLSCHUH- OBERFLÄCHENVERLUSTE TEIL II: 3D-ALGORITHMUS



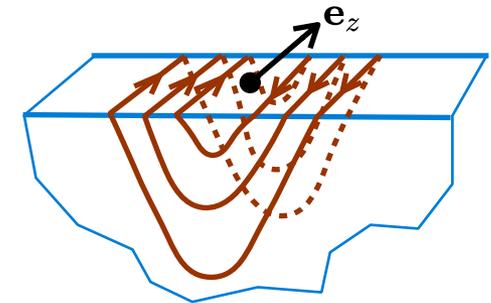
Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Rechenmodell für lamellierte Pole - Annahmen

- **Ansatz:** dreidimensionales Feld im (x, y, z) -Raum
- Berechnung der **elektrischen Stromdichte** $\underline{\mathbf{J}}(x, y, z)$
- Annahme: magnetische Flussdichte in Axial-Richtung verschwindet

$\underline{B}_z = 0$ (ähnlich einem ebenen Feld)

$$\underline{\mathbf{B}} = \frac{j}{\omega\kappa} \nabla \times \underline{\mathbf{J}} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial \underline{J}_y}{\partial x} = \frac{\partial \underline{J}_x}{\partial y}$$



- harmonische Zeitabhängigkeit **aller Feldgrößen**, somit Rechnung mit **komplexen Größen**:

$$f(x, y, z, t) = \operatorname{Re} \left\{ \underline{f}(x, y, z) \cdot \exp(j\omega t) \right\}$$

$\underline{\mathbf{B}}$... Vektor der magnetischen Flussdichte (T)

$\underline{\mathbf{J}}$... Vektor der elektrischen Stromdichte (A/m^2)

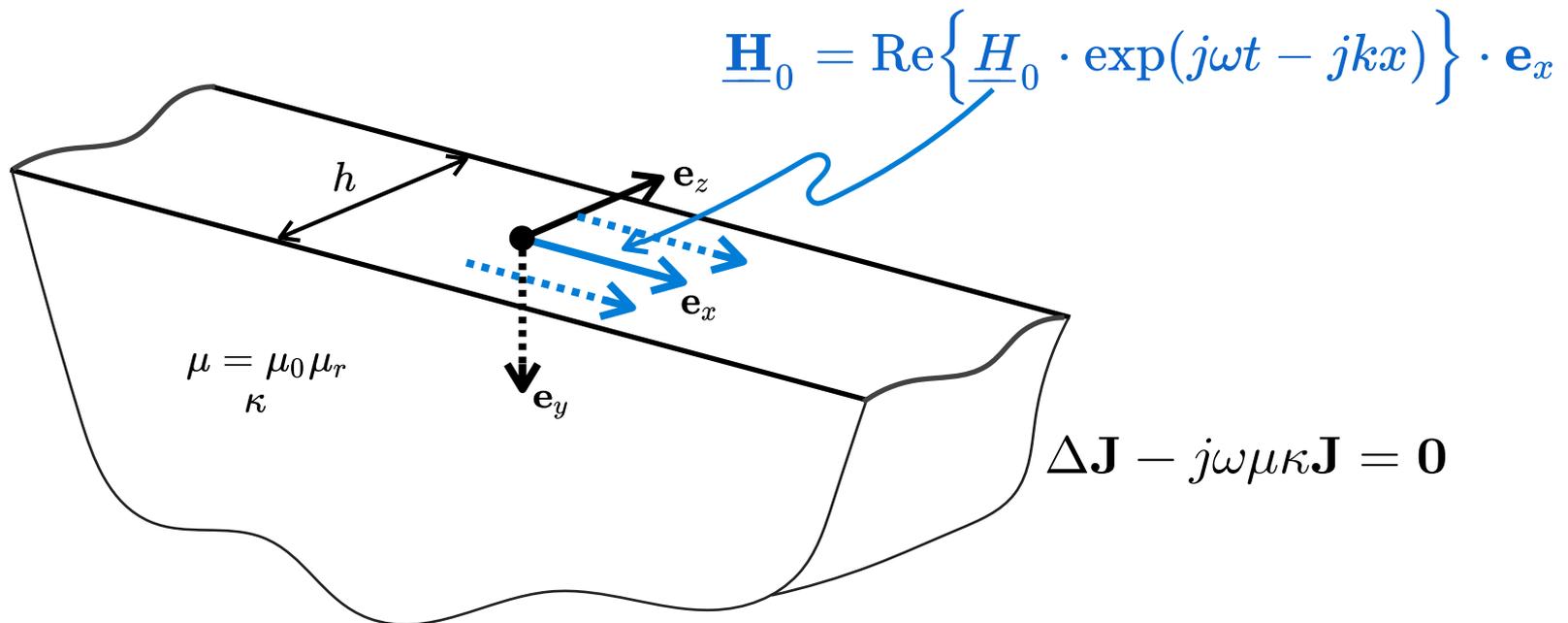
ω ... Kreisfrequenz (1/s)

κ ... elektrische Leitfähigkeit (S/m)

Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Rechenmodell für lamellierte Pole: 3D-Teilmodell

3D-Modell: Anregung nur über eine vorgegebene **x-Komponente** der magnetischen Feldstärke $\underline{\mathbf{H}}_0 = \underline{H}_0 \cdot \mathbf{e}_x$ möglich, die über die gesamte Breite h konstant ist

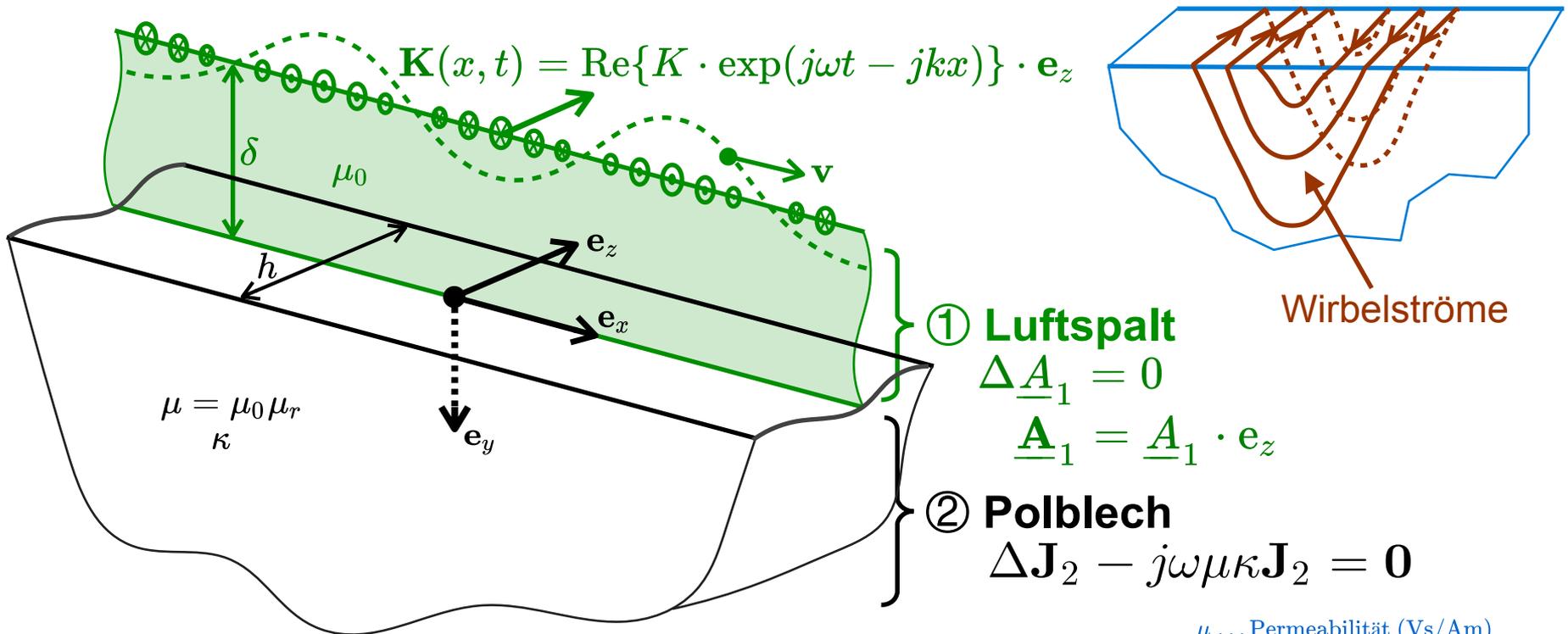


Literatur: z.B. G. Traxler-Samek. Zusatzverluste im Stirnraum von Hydrogeneratoren mit Roebelstabwicklung. Dissertation, Technische Universität Wien, Österreich, 2003.

Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Rechenmodell für lamellierte Pole - Gesamtmodell

vereinfachte Lösung: iterative Koppelung 2D-3D Modell



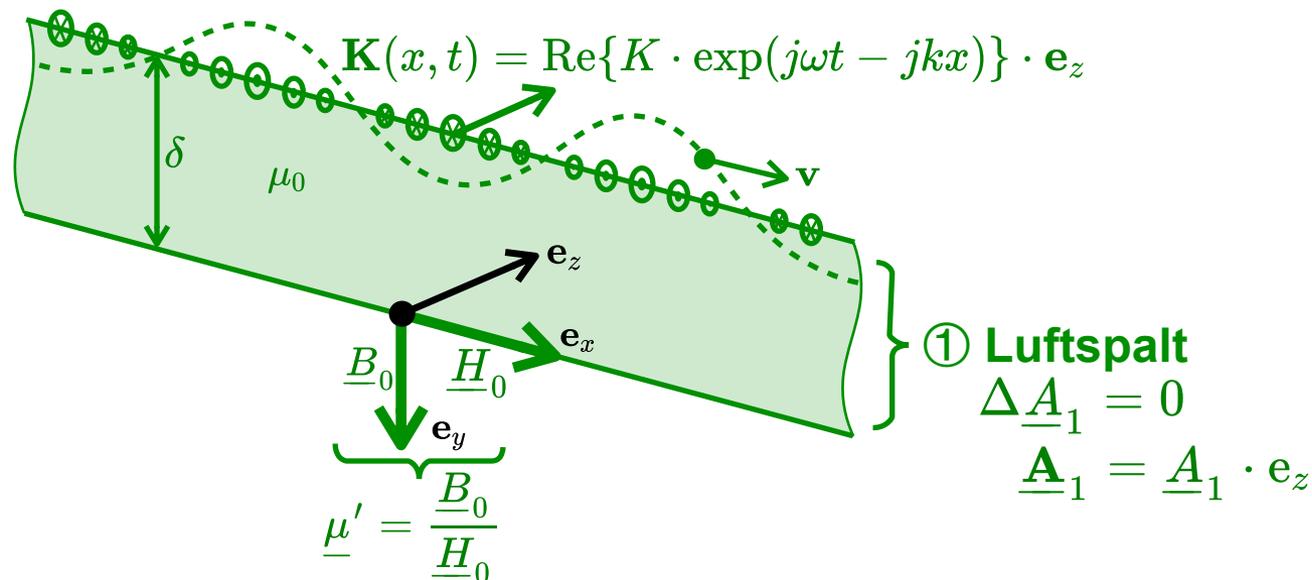
A ... magnetisches Vektorpotential (Vs/m)
 B ... magnetische Flussdichte (T)
 K ... Strombelag (A/m)

μ ... Permeabilität (Vs/Am)
 κ ... elektrische Leitfähigkeit (S/m)
 ω ... anregende Kreisfrequenz (1/s)
 k ... Kreiswellenzahl (1/m)

Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Rechenmodell für lamellierte Pole: 2D-Teilmodell

- **2D-Modell:** Luftspaltmodell, Anregung über Strombelagswelle $\mathbf{K}(x, t)$
- 3D-Modell wird über eine **mittlere** Ersatzpermeabilität $\underline{\mu}' = \underline{B}_0 / \underline{H}_0$ simuliert, diese wird aus dem 3D-Modell ermittelt
- Da \underline{B}_0 im Gegensatz zu \underline{H}_0 im 3D-Modell von z abhängt, wird der Mittelwert über die Breite h gebildet

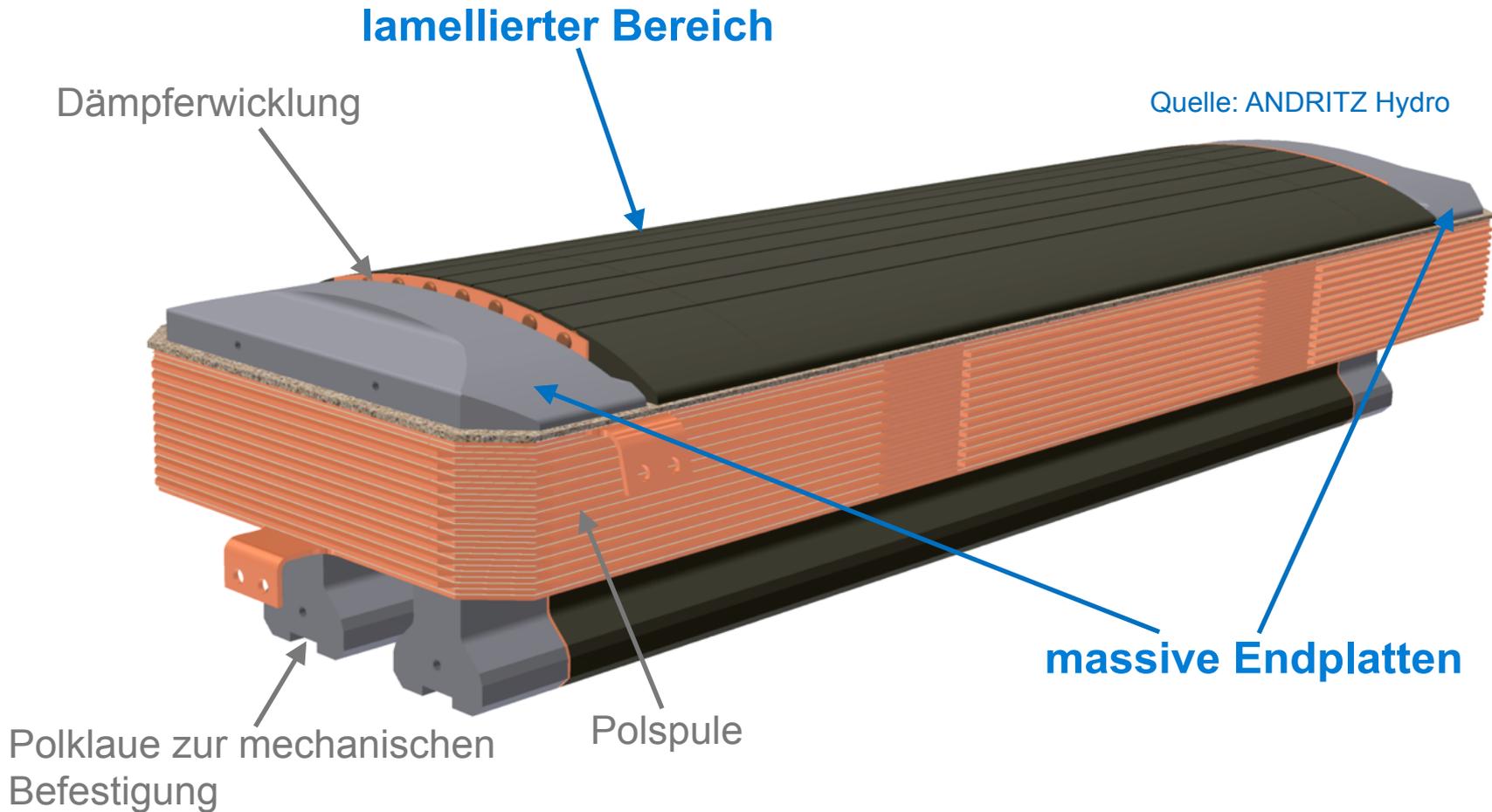




POLSCHUH- OBERFLÄCHENVERLUSTE TEIL III: VERGLEICHSBERECHNUNGEN



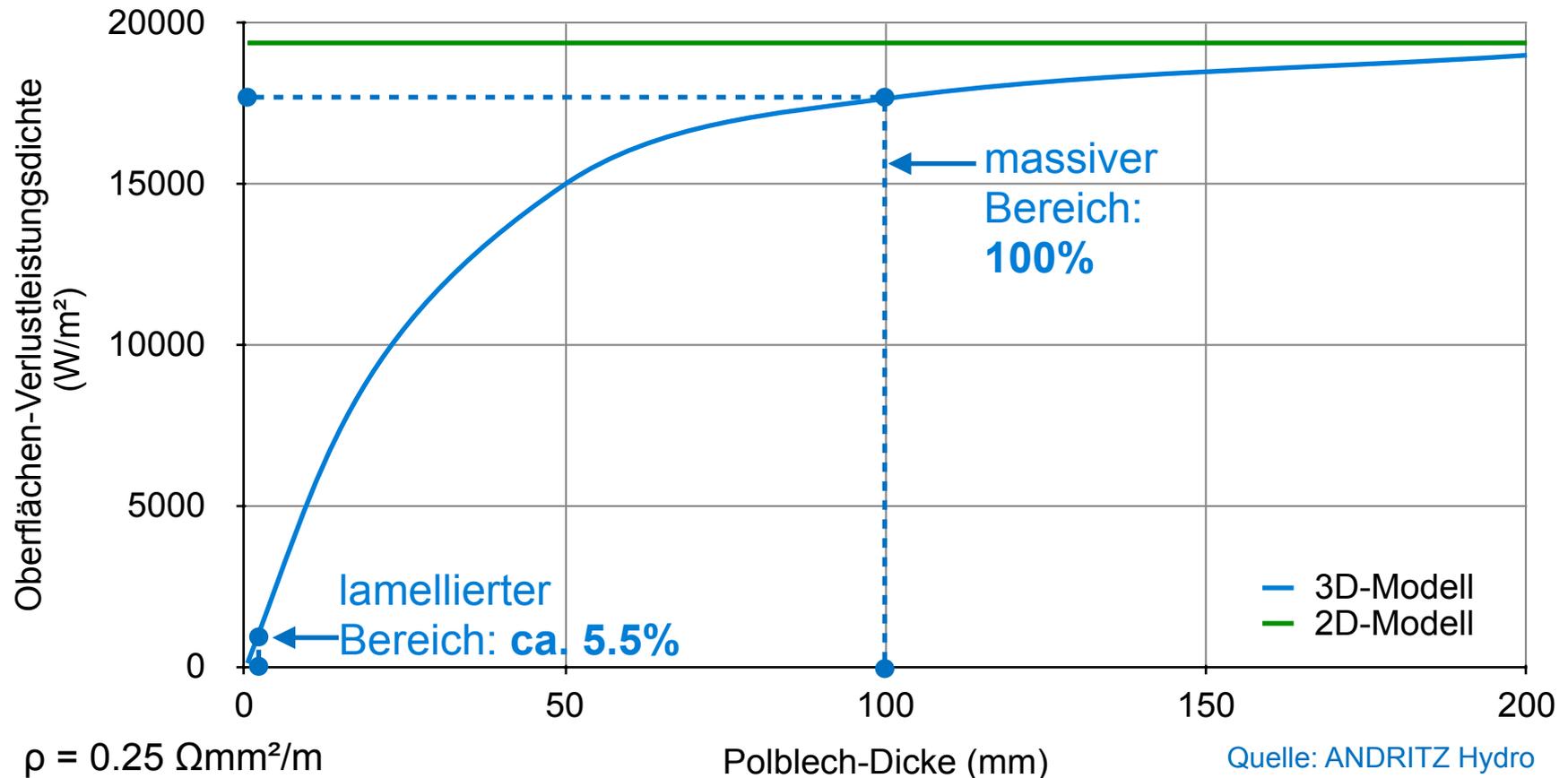
Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste lamellierter Pol mit massiven Endplatten



Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Verluste in Abhängigkeit der Blechdicke

Blechdicke 0.5 - 200 mm, Frequenz 1500 Hz, Wellenlänge 80 mm,
Luftspalt 20 mm, Flussdichtenamplitude $B = 0.05$ T (Normalkomponente),

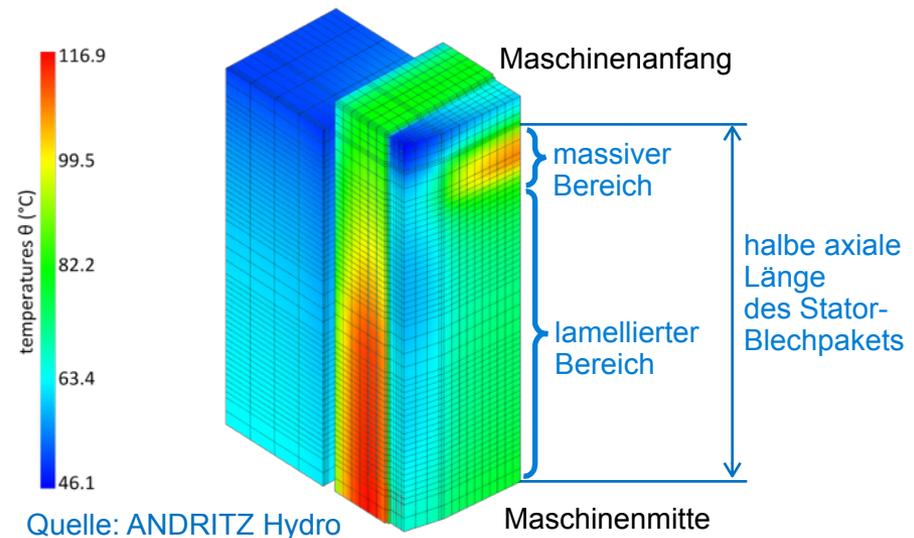


Elektrische Berechnungen - Polschuhverluste

Überprüfung des Berechnungsverfahrens

- **Vergleich mit numerischer Feldberechnung:**
 - einfach möglich für Massivpole (2D)
 - sehr aufwendig für lamellierte Pole (3D)
- **Verlustmessung:**
 - über Poynting-Vektor-Sensor
 - über Erwärmungen in einer Labormaschine

dreidimensionale **thermische
Finite-Differenzen Berechnung**
1/4 Pol modelliert



EINLEITUNG

Computerunterstützung

Berechnung von Hydrogeneratoren

DIMENSIONIERUNG

Komponenten

Dimensionierung der Statorwicklung

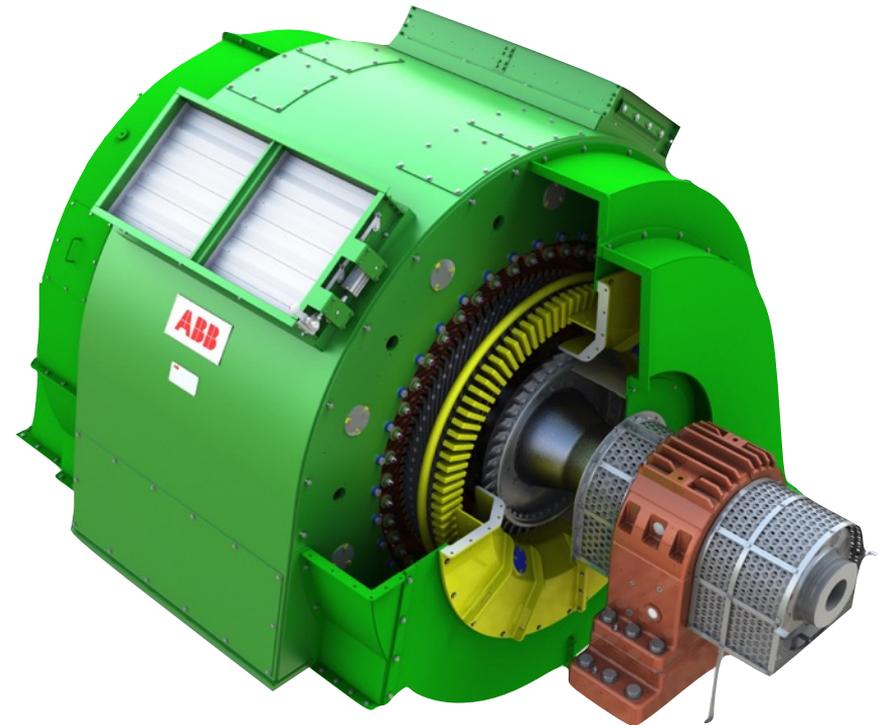
ELEKTRISCHE BERECHNUNGEN

Übersicht

Polschuh-Oberflächenverluste

OPTIMIERUNG

ZUSAMMENFASSUNG



Quelle: ANDRITZ Hydro

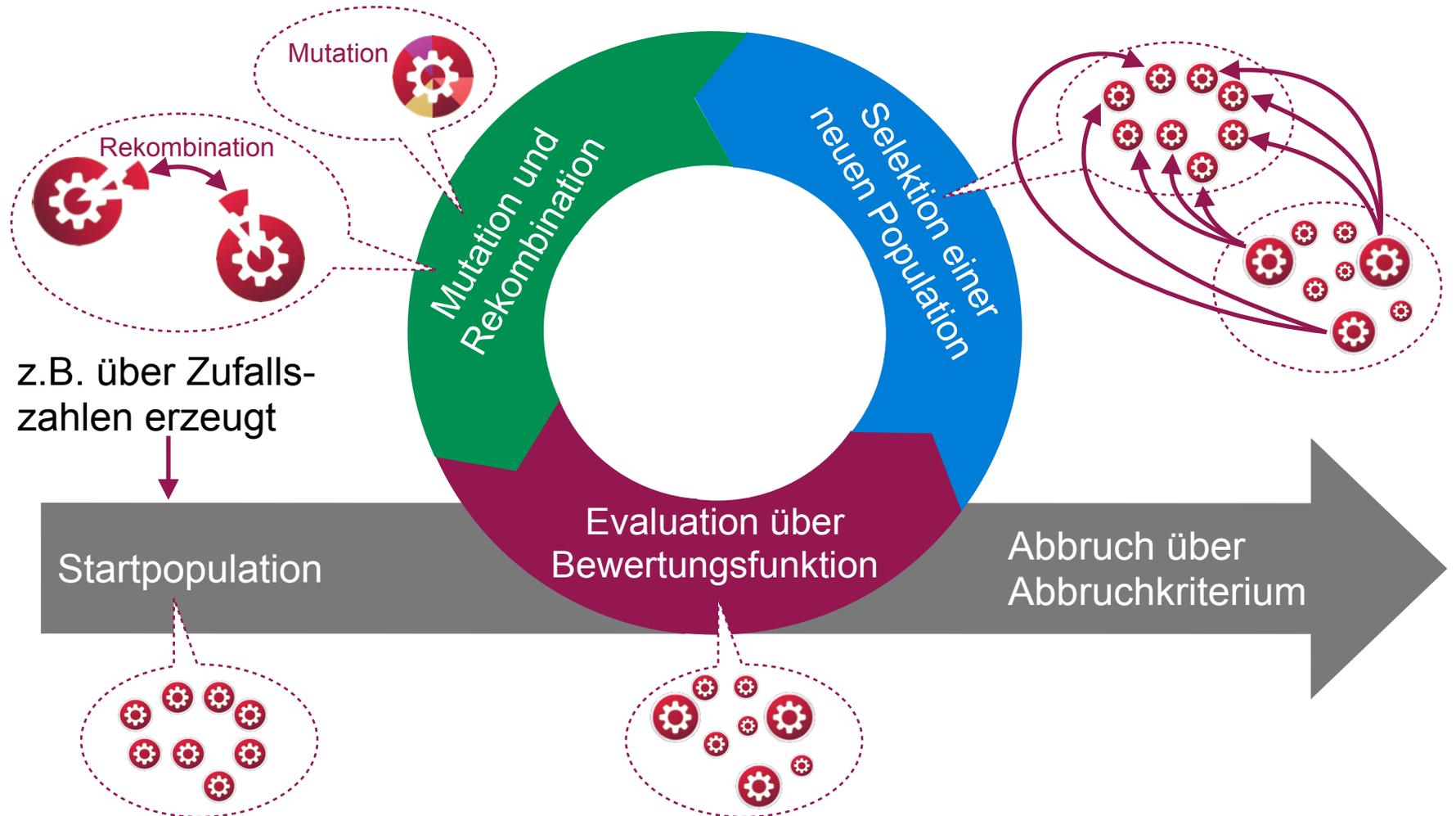


GENETISCHE ALGORITHMEN



Optimierung - Genetische Algorithmen

Einführung



OPTIMIERUNG VON SYNCHRONMASCHINEN

Optimierung von Synchronmaschinen

Steuerparameter für die Optimierung

- **Steuerparameter:** *relative* Veränderung der Maschinenparameter
- Beispiel - **Polschuhbreite:** diese ist relativ zur Polteilung definiert d.h. bei Veränderung des Stator-Durchmessers, bleibt die Polschuhbreite relativ gesehen gleich

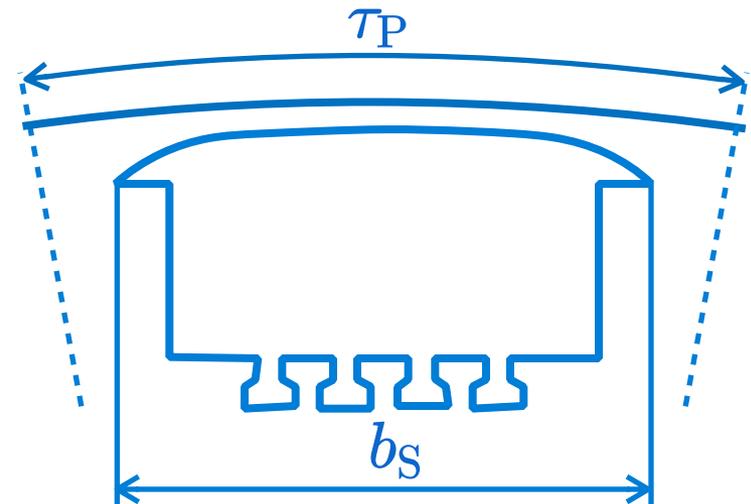
$$\frac{b_s}{\tau_P} = f(2p) \cdot c^s$$

Steuerparameter $s \in [-1, +1]$



relative Veränderung des
"natürlichen" Wertes aus
der Kurve, z.B. $c = 1.25$

Verhältnis Polschuhbreite zu
Polteilung wird einer Kurve
entnommen



Optimierung von Synchronmaschinen

Parameter der Optimierung

- **16 Maschinenparameter zur Optimierung:**
 - Hauptabmessungen: *Anlaufzeitkonstante, Ausnützungsziffer*
 - Statorwicklung: *Stator-Spannung, Nutteilung, Luftspalt-Flussdichte*
 - Statorabmessungen: *Joch-Flussdichte, Stromdichte, Verhältnis Nuthöhe zu Nutbreite, Teilleiterhöhe*
 - Rotorabmessungen: *Luftspalt, Polschuhform (1 Parameter), Polabmessungen (4 Parameter), Polwicklungsbreite*
- **Vorgangsweise:**
 - einstufiges Verfahren: alle 16 Parameter werden optimiert
 - zweistufiges Verfahren:
 - Stufe 1: 9 Parameter (Hauptabmessungen, Stator)
 - Stufe 2: 7 Parameter (Rotor)

Optimierung von Synchronmaschinen

Bewertungsfunktion (Fitnessfunktion) für Optimierung

Gewichtungsfaktoren

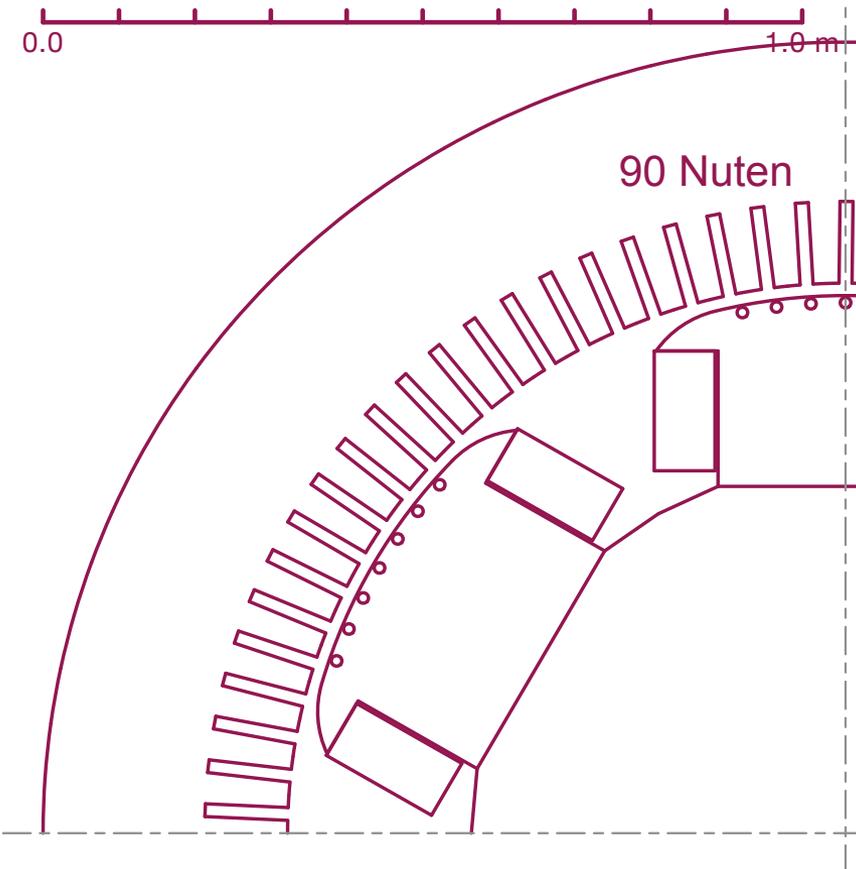
$$\begin{aligned}
 C_i = & C \cdot g_c + (P - P_0) \cdot g_P + \Delta J_M \cdot g_M + \Delta x_d \cdot g_x + (\Delta J_s + \Delta J_r) \cdot g_J \\
 & + (\Delta B_T + \Delta B_P) \cdot g_B + \Delta \sigma_p / \sigma_{\max} \cdot g_\sigma
 \end{aligned}$$

Herstellungskosten Aktivteile (z.B. EUR) → g_c (pu)
 Gesamtverluste (kW) → g_P (EUR/kW)
 Referenzverluste (kW) → g_P (EUR/kW)
 Unterschreitung Massenträgheitsmoment (kgm²) → g_M (EUR/(kgm²))
 Überschreitung Synchronreaktanz (pu) → g_x (EUR/pu)
 Überschreitung max. Stromdichte in Stator und Rotor (A/mm²) → g_J (EUR/(A/mm²))
 Überschreitung max. mech. Spannung im Pol (MPa) → g_σ (EUR/pu)
 Überschreitung max. Flussdichte im Pol (T) → g_B (EUR/T)
 Überschreitung max. Flussdichte im Zahn (T) → g_B (EUR/T)

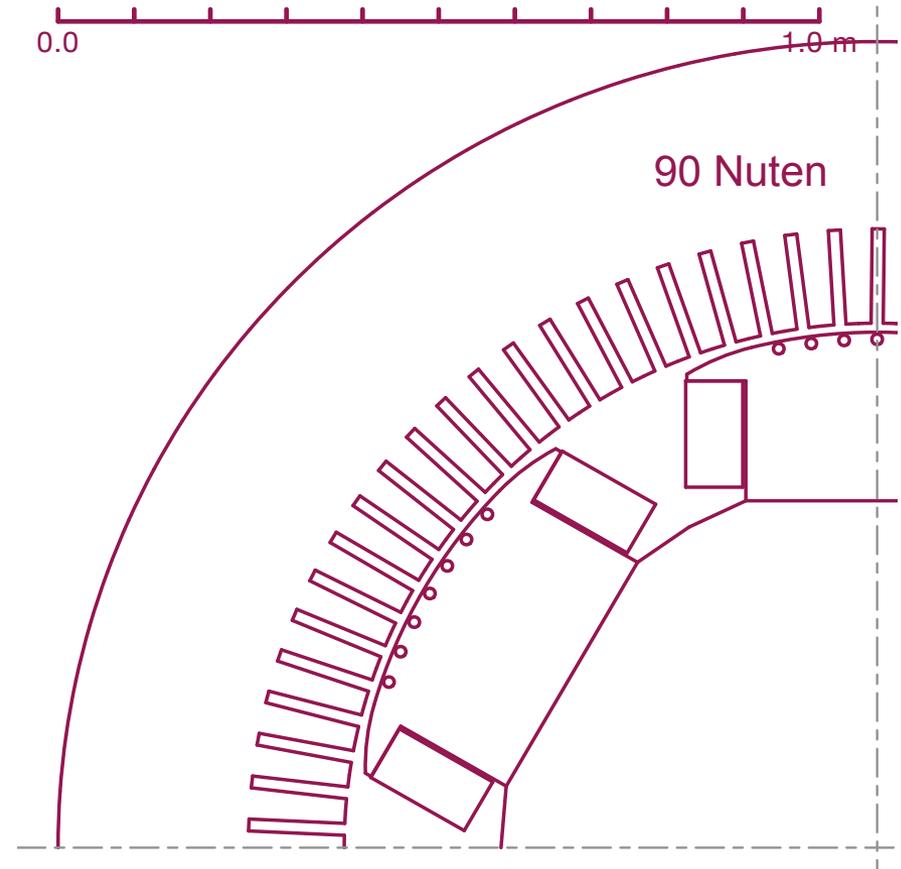
Optimierung von Synchronmaschinen

Beispiel 20 MVA, 6-polig, 6000 V

optimierte Variante



ausgeführte Variante (2012, ohne Optimierung)



Optimierung von Synchronmaschinen

Beispiel 20 MVA, 6-polig, 6000 V

Population: $N = 40$

Mutations- und Rekombinationswahrscheinlichkeit: $p_M = p_R = 0.1$

Parameter	optimiert	ausgeführt	Einheit
Stator-Innendurchmesser	1470.0	1400.0	mm
Stator-Eisenlänge	1840.0	1600.0	mm
Stator-Nutenzahl	90	90	
Luftspalt	16.6	12.0	mm
Synchron-Reaktanz	1.090	1.100	p.u.
Gesamtverluste bei Nennlast	248.0	258.0	kW
Herstellungskosten (Aktivteile, ohne Montage)	1272.0	1198.5	kEUR
4 kEUR / kW → Bewertete Herstellungskosten	1272.0	1238.5	kEUR
Abweichung von der ausgeführten Variante	2.7	0.0	%

Optimierung führt nahe an das Ziel, Feinjustierung eines erfahrenen Ingenieurs ist notwendig!

EINLEITUNG

Computerunterstützung

Berechnung von Hydrogeneratoren

DIMENSIONIERUNG

Komponenten

Dimensionierung der Statorwicklung

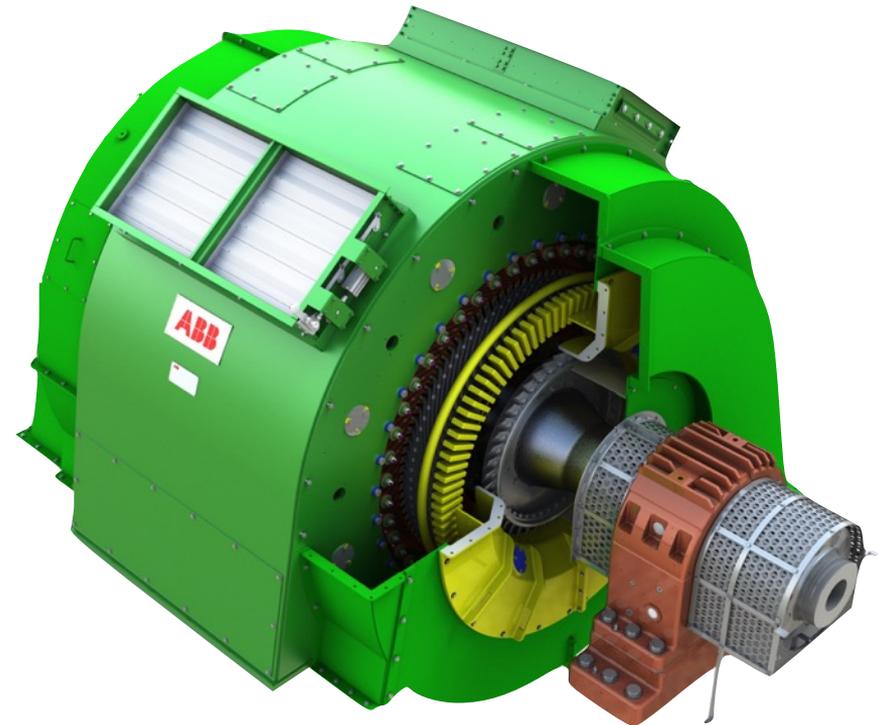
ELEKTRISCHE BERECHNUNGEN

Übersicht

Polschuh-Oberflächenverluste

OPTIMIERUNG

ZUSAMMENFASSUNG



Quelle: ANDRITZ Hydro

- Einblick in die **Computerunterstützte Dimensionierung** und **elektrische Berechnung** von Schenkelpol-Synchrongeneratoren:
 - Dimensionierung: *Statorwicklung*
 - elektrische Berechnung: *Polschuhoberflächenverluste* und *anregende Radialkraftwellen*
- **Computerunterstützung**:
 - erlaubt Implementierung von **aufwendigen Berechnungsverfahren**
 - fördert die **Arbeitseffizienz**
 - vereinfacht den Prozess der **Optimierung**
- **Expertenprogramme**: trotz einfacher Bedienung braucht man weiterhin den **erfahrenen Berechnungsingenieur**
 - Erfassung der Zusammenhänge zwischen Parametern
 - Prüfung der Plausibilität der Ergebnisse

Computerunterstützte Berechnung von Schenkelpol-Synchrongeneratoren für Wasserkraftwerke



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

