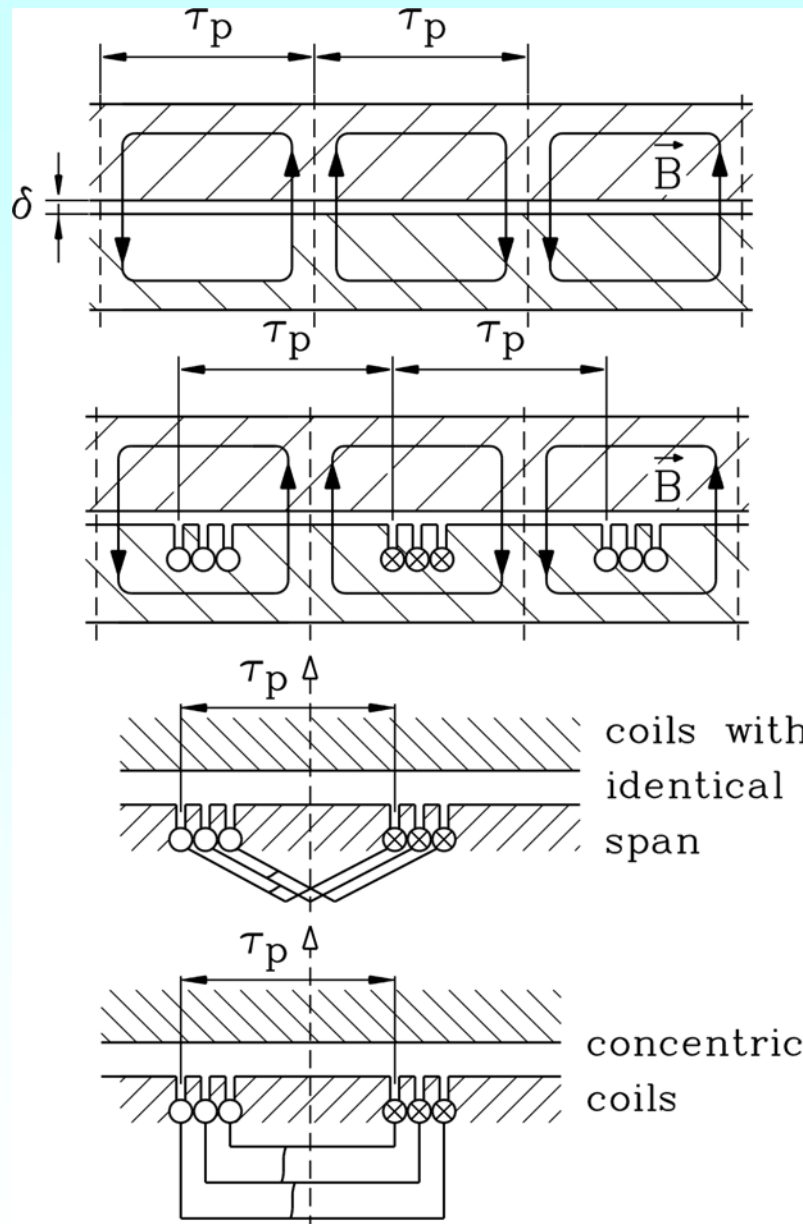


8. Verteilte Wicklung - Zahnspulenwicklung

A) Verteilte Wicklung



Single layer winding

- Per slot only one coil side is placed.
- Coils manufactured as:
 - a) **Coils with identical coil span:** $W = \tau_p$
 - b) **Concentric coils**

Example:

Three-phase, 12-pole machine with $q = 3$ coils per pole and phase:

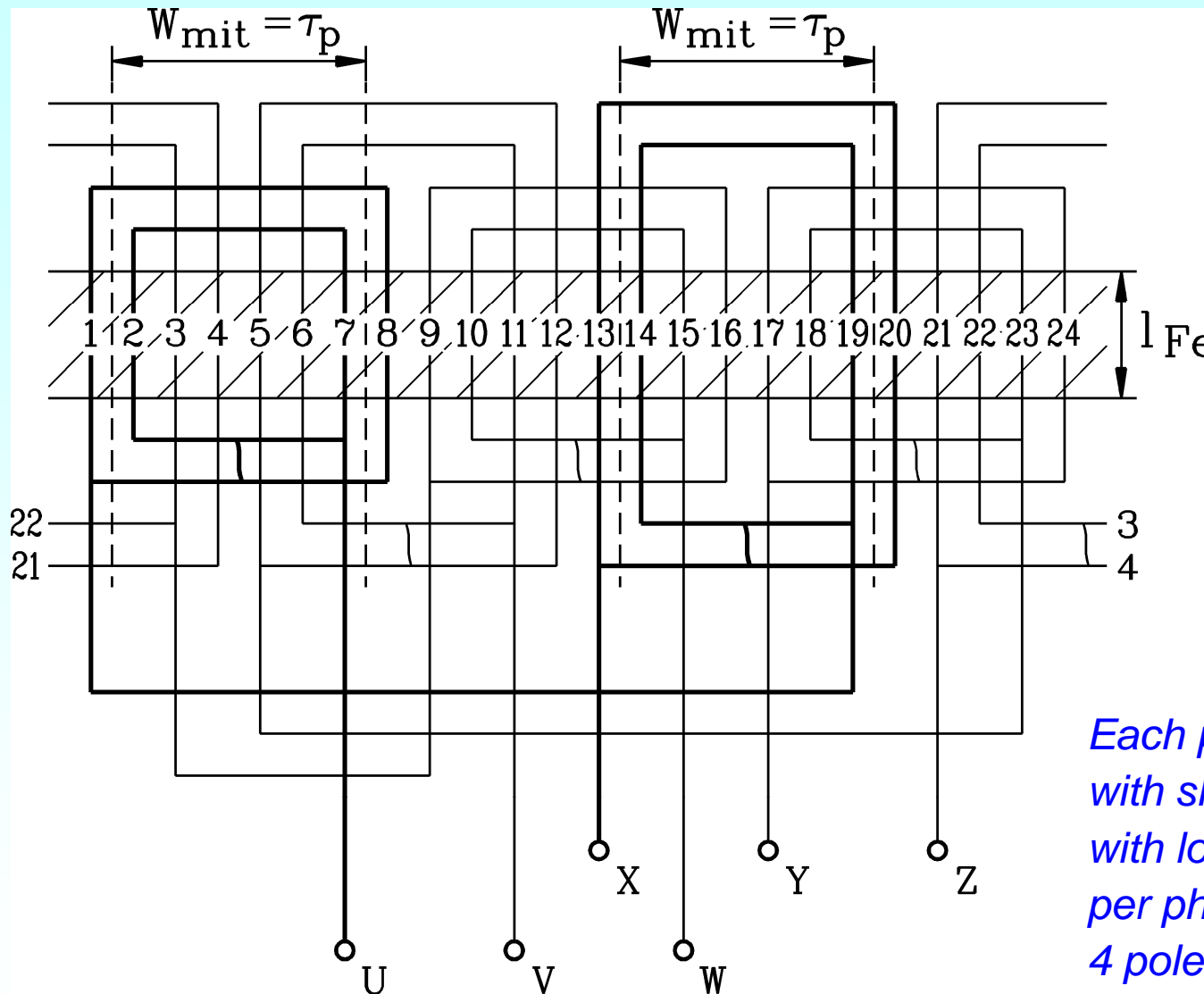
Total slot number: $Q = m \cdot 2p \cdot q = 3 \cdot 12 \cdot 3 = \underline{108}$

North- and south pole are generated by **ONE coil group per phase**.

Problem with single layer windings:

Crossing of coils in winding overhang part, as all coils are lying in the same plane. Thus some coils must be bent upward in winding overhang region ("**2nd plane**").

Example: Single layer winding with short and long coils



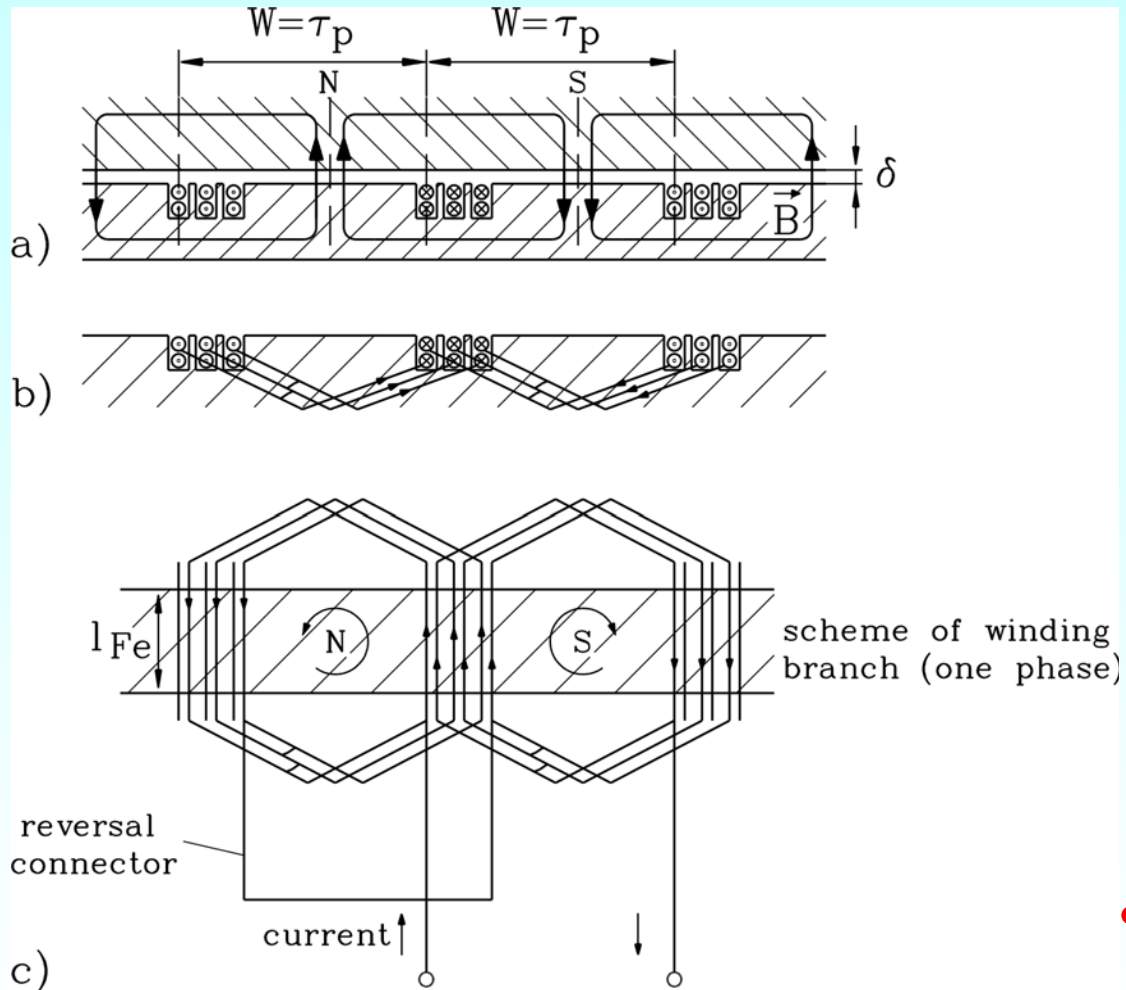
Unrolled winding system gives “winding scheme”: here: four-pole machine: $2p = 4$, $m = 3$, $q = 2$, $Q = \underline{24}$

Winding manufactured with concentric coils.

“Long coils”: Winding overhang part of coils is longer; so these coils may be bent upwards !

Each phase has one pole pair with short and one pole pair with long coils ! So resistance per phase is equal, but minimum of 4 poles required !

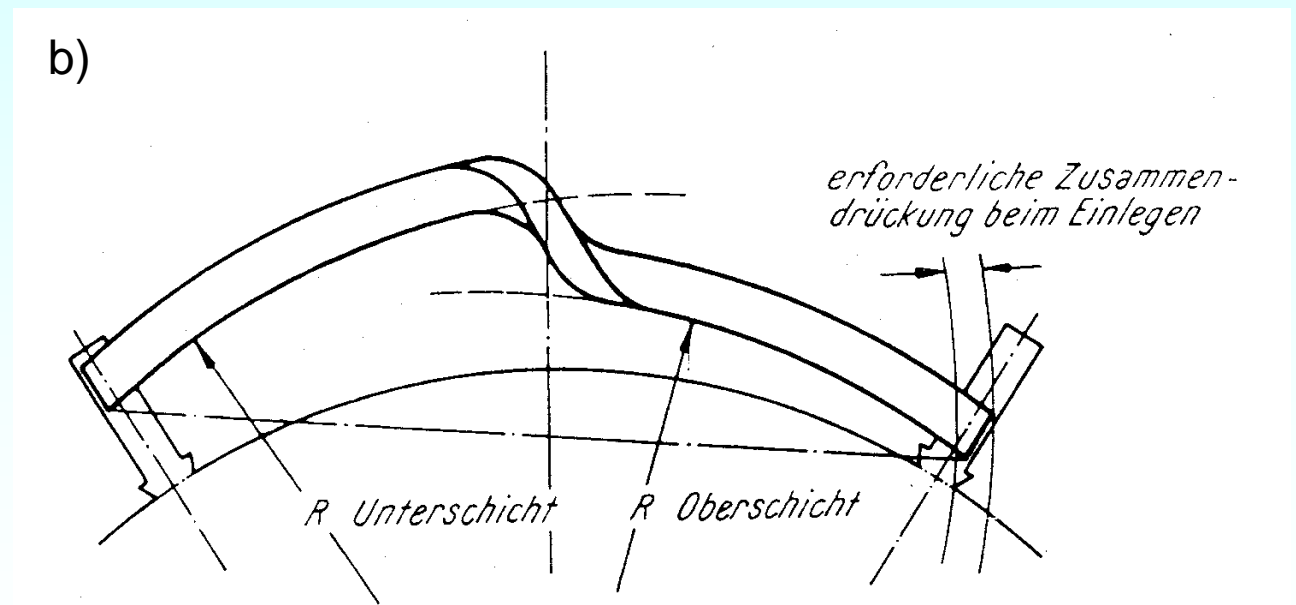
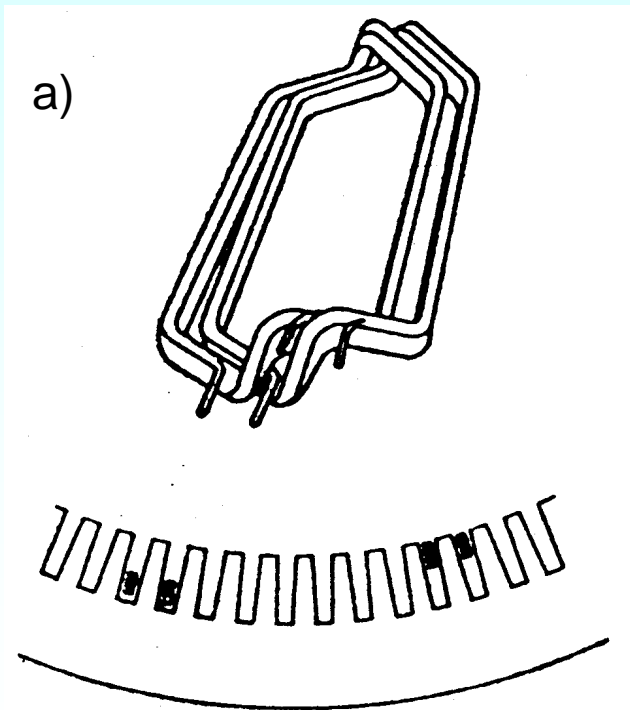
Two-layer winding



- Coils with **equal span**
- **Two-layer winding:** Per slot TWO coil sides are placed one above the other.
- North- and south pole are generated by **two** coil groups.
- Direction of current flow in N- and S-pole coils opposite !
- Changing of current flow direction by **reversal connector**.
- Bigger machine ratings typically above 500 kW: **Profiled coil conductors** (rectangular cross section), **round wire** with smaller machines !
- **Example:** For 4-pole machine we need four coil groups per phase !

Winding overhang of two-layer winding

- a) Two form wound coils before being put into the stator slots: Due to S-shape in winding overhang part of coils there are **NO** crossing points of the coils.
- b) Form wound coil with profiled conductor, placed in stator slot, with left coil side in lower and right coil side in upper layer. **Manufacturing** much more expensive than with round wire single-layer winding, therefore used usually only in bigger machines: e.g. **high voltage machines** up to 30 kV (**“High voltage”**: $U > 1000 \text{ V (rms)}$!).



Series and parallel connection of coil groups

- **Series and parallel connection** of coil groups to get one **winding phase**

- Example : Eight-pole machine:

Two-layer winding: 8 coil groups, which may be connected as follows:

$a = 1$: Series connection of all 8 coil groups

$a = 2$: 4 coil groups in series, then paralleling the two series sections

$a = 4$: 2 coil groups in series, then paralleling the four series sections

$a = 8$: All 8 coil groups are connected in parallel

Single-layer winding: 4 coil groups, which may be connected as follows:

$a = 1$: Series connection of all 4 coil groups

$a = 2$: 2 coil groups in series, then paralleling the two series sections

$a = 4$: All 4 coil groups are connected in parallel

- Resulting **number of turns per phase** N :

$$N = \frac{pqN_c}{a}$$

Single-layer winding

$$N = \frac{2pqN_c}{a}$$

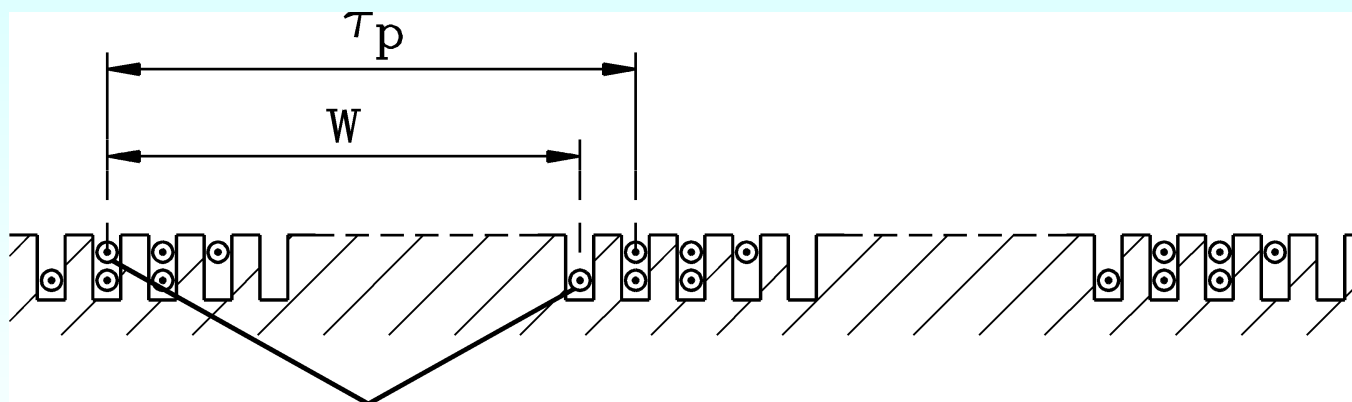
Two-layer winding

- Example: $2p = 4$, $q = 2$, eleven turns per coil ($N_c = 11$), series connection of all coil groups: $a = 1$: number of turns per phase: $N = 4 \cdot 2 \cdot 11 / 1 = \underline{88}$

Pitching (chording) of coils $W < \tau_p$

- With **Two-layer windings: pitching of coils** is possible !
- **Pitching** = Shortening of coil span W , counted in number S of slot pitches

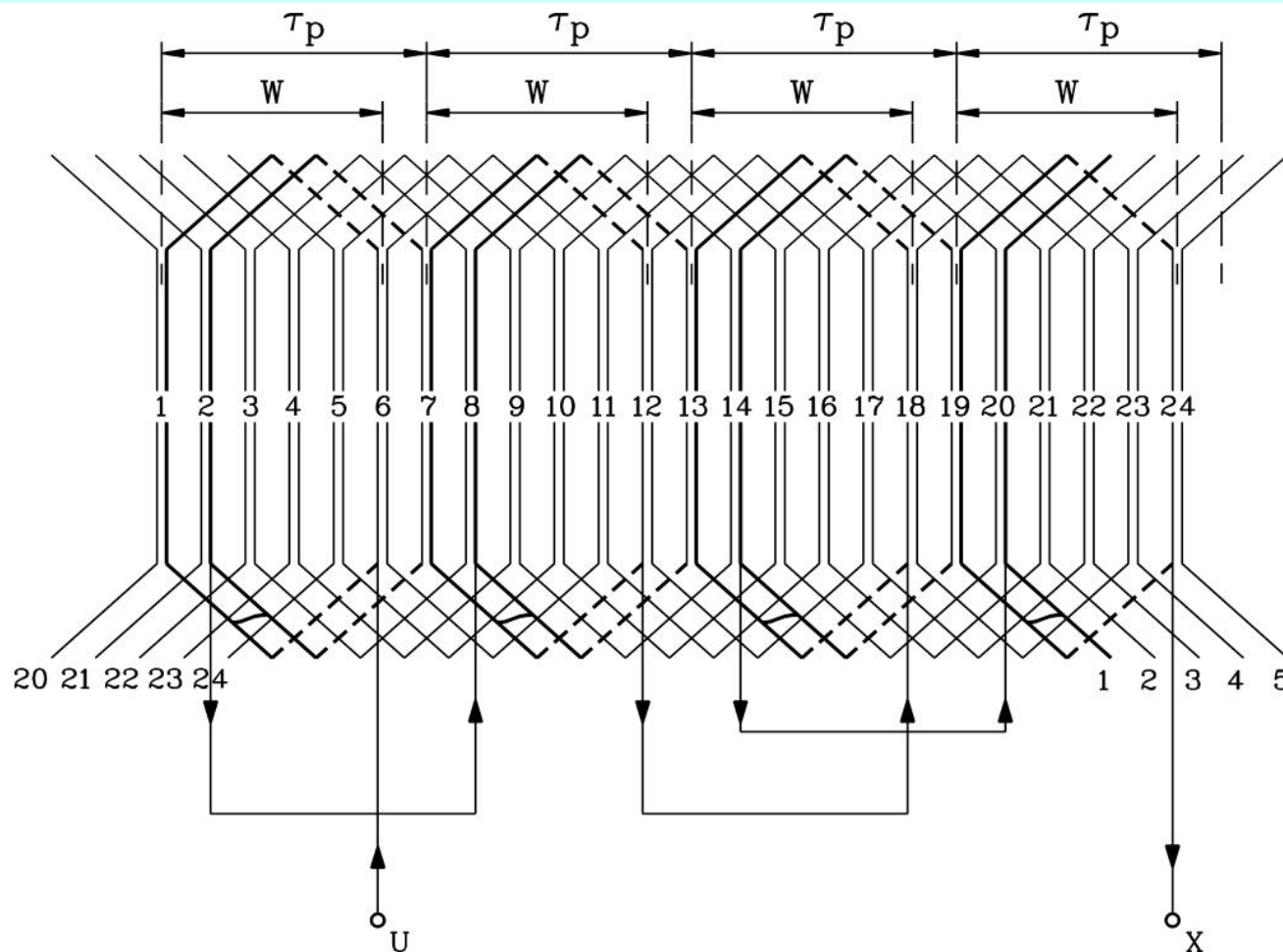
$$W = \tau_p \cdot \frac{m \cdot q - S}{m \cdot q} = \tau_p \cdot \frac{Y_Q}{m \cdot q} \quad S : \text{integer number}$$



- **Benefit of pitching:** Shape of field curve fits better to ideal sinusoidal shape.
- **Example:** Four-pole machine: Data: $m = 3$, $Q = 24$, $q = 2$:
Pitching is possible for $S < mq = 3 \cdot 2 = 6$: $S = 1, 2, 3, 4, 5$.
e. g.: $S = 1$, hence pitching is $W/\tau_p = 5/6$.

Example: Pitched Two-layer winding

- Four pole machine, $m = 3$, $Q = 24$, $q = 2$: Pitching $W/\tau_p = 5/6$.



Verteilte Wicklung: Ganzlochwicklung - Bruchlochwicklung

- **Ganzlochwicklung:** Die Anzahl der Spulen je Pol und Strang q ist eine ganze Zahl

Beispiel:

Vierpolige Maschine $2p = 4$, Strangzahl $m = 3$, Nutzahl $Q = 24$, $q = Q/(2p \cdot m) = 2$

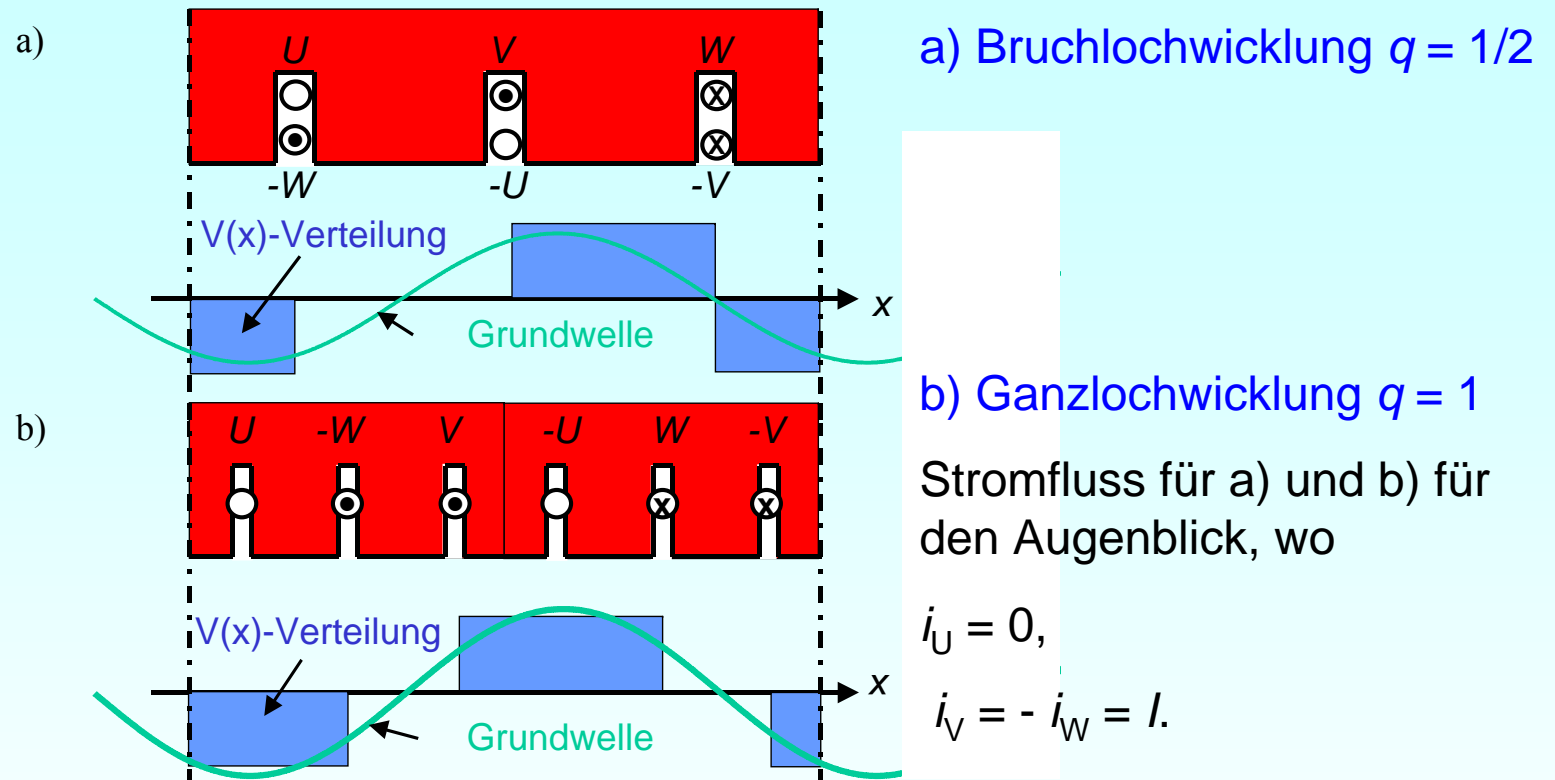
- **Bruchlochwicklung:** Die Anzahl der Spulen je Pol und Strang q ist ein echter Bruch

Beispiel:

Vierpolige Maschine $2p = 4$, Strangzahl $m = 3$, Nutzahl $Q = 18$, $q = Q/(2p \cdot m) = 1,5$

Das heißt: Jeder Pol hat je Strang abwechselnd 1 bzw. 2 Spulen in Serie, daher im Mittel 1.5 Spulen je Pol und Strang.

Vergleich Ganzloch- mit Bruchlochwicklung

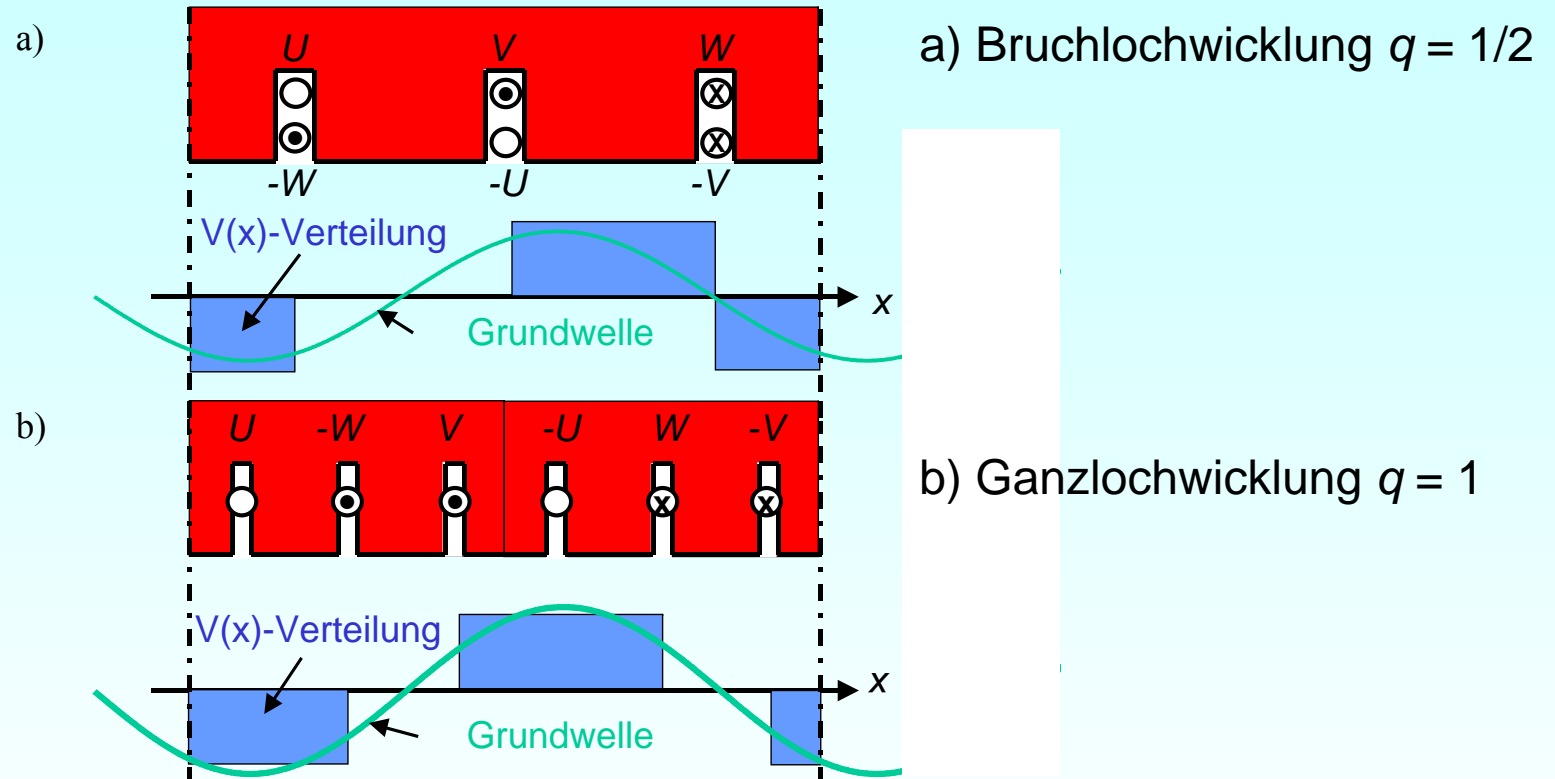


Das Magnetfeld der Ganzlochwicklung ist für N- und S-Pol identisch, daher hat das Feld Ordnungszahlen 1, -5, 7, -11, 13, ...

Das Magnetfeld der Bruchlochwicklung ist für N- und S-Pol unterschiedlich. Es hat daher erhöhte Oberwellen und fallweise auch Unterwellen: 1, -2, 4, -5, 7, -8, 10, -11, 13, ...

B) Zahnspulenwicklung

Bruchlochwicklung als Zahnspulenwicklung



Bruchlochwicklungen mit $q < 1$ umfassen mit einer Spulenweite nur einen Zahn. Daher können die einzelnen Stränge getrennt werden. Jede Spule wird zu einer **Zahnspulenwicklung** mit einem kurzen Wickelkopf.

Zahnspulenwicklung $q = 1/2$

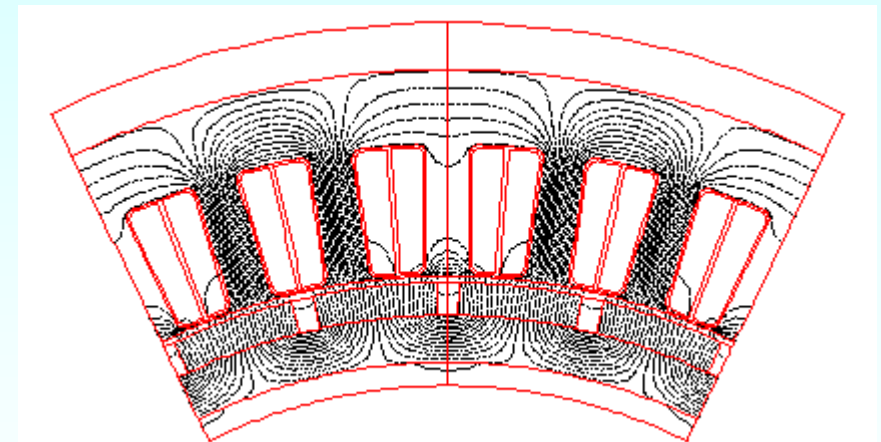
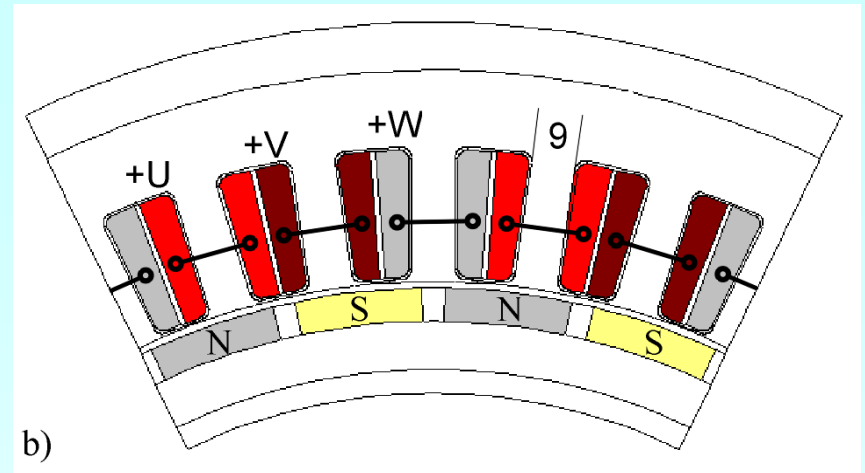
Vorteile von Zahnspulenwicklungen:

- Einfache elektrische Isolierung der Phasen in den Nuten und Wickelköpfen
- Hochpolige Ausführung möglich
- Einfache Spulenfertigung
- Ev. Aufsteckspulen mit hohem Nutfüllfaktor
- Kurze Wickelköpfe - geringe Stromwärmeverluste

ABER: durch erhöhte Anzahl Harmonischer erhöhte Oberwellenstreuung: $\cos \phi$ sinkt

Bei $q = 1/2$: keine Unterwellen, nur Oberwellen: 1, -2, 4, -5, 7, -8, 10, -11, 13, ...

ABER: Spulenweite $W = 2/3$ der Polteilung, daher Sehnungsfaktor der Grundwelle: 0.866
Flußverlust von 13% !



Leerlaufbild, 24-polige Maschine,
 $q = 1/2$, 36 Ständernuten

Zahnspulenwicklung $q = 1/4$

Bei $q = 1/4$: Über den Zwischenzahn wird der Abstand der Nutöffnungen einer Spule so eingestellt, dass sich Spulenweite = Polteilung ergibt.

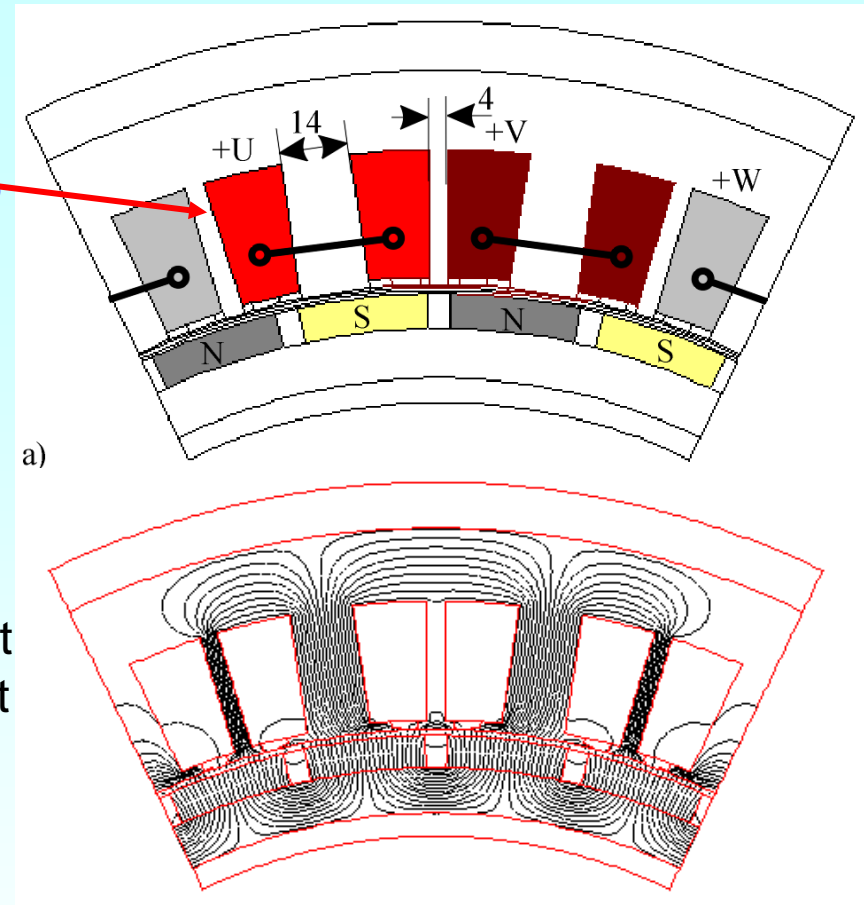
Daher: Sehnungsfaktor der Grundwelle: 1. Kein Flußverlust !

ABER: Bei $q = 1/2$: Auch Unterwellen, den das Wellenspektrum: 1, -2, 4, -5, 7, -8, 10, -11, 13, ... Bezieht sich auf die jeweils längste Wellenlänge (Urschema der Wicklung). Diese Wellenlänge umfaßt vier Läuferpole. Daher bilden die Läuferpole NUR mit der Welle der Ordnungszahl -2 ein konstantes Drehmoment.

Ordnungszahl 1: Unterwelle

Ordnungszahlen 4, -5, 7, -8, 10, Oberwellen

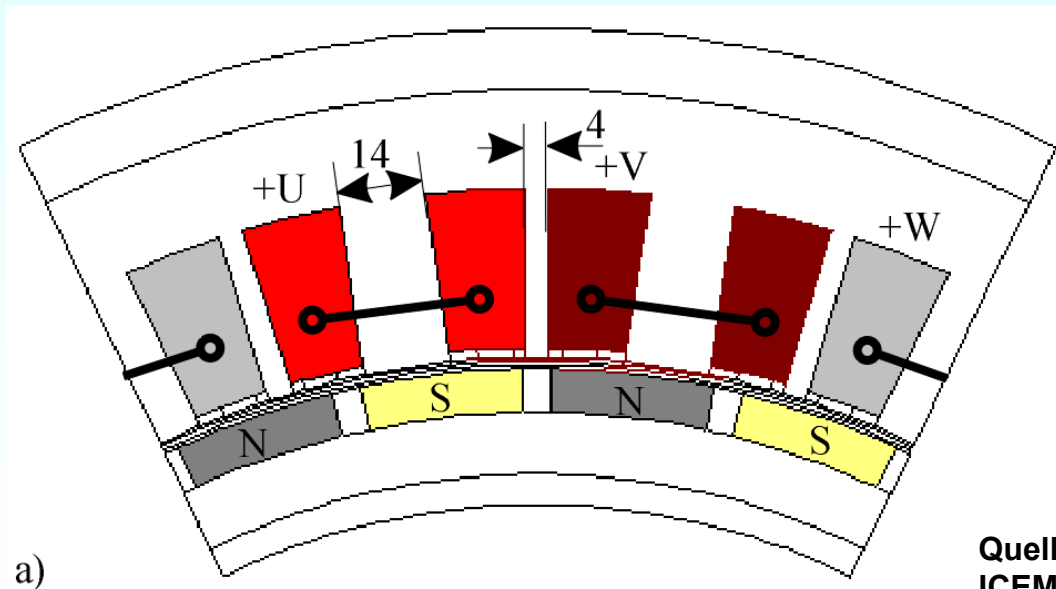
Durch die große magnetische Energie der Unterwelle steigt „Unter-/Oberwellenstreuung“ an, der $\cos \phi$ sinkt deutlich !



Leerlauf, 24-polige Maschine, $q = 1/4$, 36 Ständernuten, indem die 18 Nuten durch Zwischenzähne geteilt werden.

Modulare Synchronmaschine - Prinzipianordnung

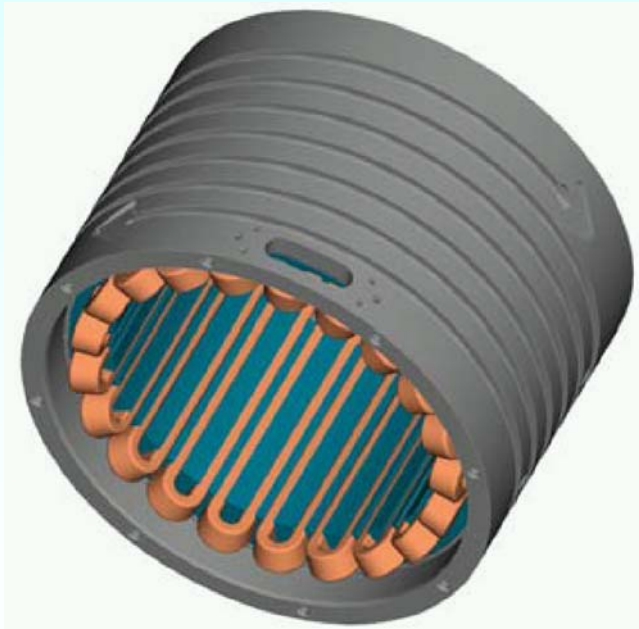
- Beispiel: Dreiphasig U, V, W, auf 4 Läuferpole ergeben sich $z_s = 3$ Module, ergibt ein Urschema
- Jedes Modul: 1 Strangspule: ergibt bei 24 Polen: 6 Urschemen mit 36 Nuten
- Tiefste Unterwelle: Wellenlänge entspricht $2\pi = 1$ Urschema
Arbeitswelle: Wellenlänge entspricht $2\pi/2$ ("2. Oberwelle")



Quelle: TU Darmstadt, Publikation
ICEM, Brügge, 2002

Modulare Synchronmaschine als Torque-Motor

- Beispiel: Dreiphasig U, V, W, Zahnspulentechnik, jeder Zahn ist ein **Modul**, Spulenfolge U, V, W, $2p = 28$ Läuferpole, $z_s = 21$ Module, Permanentmagnetläufer, 4 Läufermagnetpole je 3 Module = 1 **Urschema**
- Tiefste Unterwelle: Wellenlänge entspricht 2π
Arbeitswelle: Wellenlänge entspricht $2\pi/2$ ("2. Oberwelle")



Wassermantelgekühlte Statoren von PM-Torque-Motoren: links: Spulenanordnung, rechts: ausgeführte Statoren; Quelle: Siemens AG

Hochpolige Maschinen: "leichte" Aktivmassen

- Vergleich Polzahl $2p$ und DOPPELTE Polzahl $2p' = 2 \cdot (2p)$ bei
 - gleichen Querschnittsabmessungen je Pol,
 - damit auch gleichen Stirnverbinderlängen l_b , ($l_b/l_{Fe} = 0.2$ bei $2p$)
 - gleiche Leistung P und M , n , U , I und gleichem B_δ , A , J .

Polzahl $2p$	$2p' = 2 \cdot 2p$	$2p$
Bohrungsdurchmesser $d = 2p\tau_p$	200%	100%
Aktiv-Eisenlänge $l_{Fe} \sim M/(d^2 AB_\delta)$	25%	100%
Elektrische Ständerfrequenz $f = p \cdot n$	200%	100%
Aktiv-Eisenmasse Stator $m_{Fe} \sim d \cdot l$	50%	100%
Aktiv-Kupfermasse $m_{Cu} \sim (l_{Fe} + l_b) \cdot 2p$	75%	100%
Magnetmasse $m_M \sim h_M \cdot d \cdot l_{Fe}$	>50% *)	100%
OHM'sche Verluste $R I^2 \sim m_{Cu}$	75%	100%
Fliehkraft-Spannung $F/A \sim m_R \cdot d \cdot n^2 / (d \cdot l_{Fe})$	200%	100%
Stator-Eisenverluste $P_{Fe} \sim f^{1.8} \cdot B^2$	350%	100%

- *) Wegen erhöhter Polstreuung ca. 65% für gleichen Luftspaltfluß
- Hohe Polzahl \Rightarrow Leichtbau \Rightarrow bei gleicher Ausnutzung C_{Esson}
 ABER:
 - verlustarme Bleche,
 - "Mittelfrequenz"-Umrichter

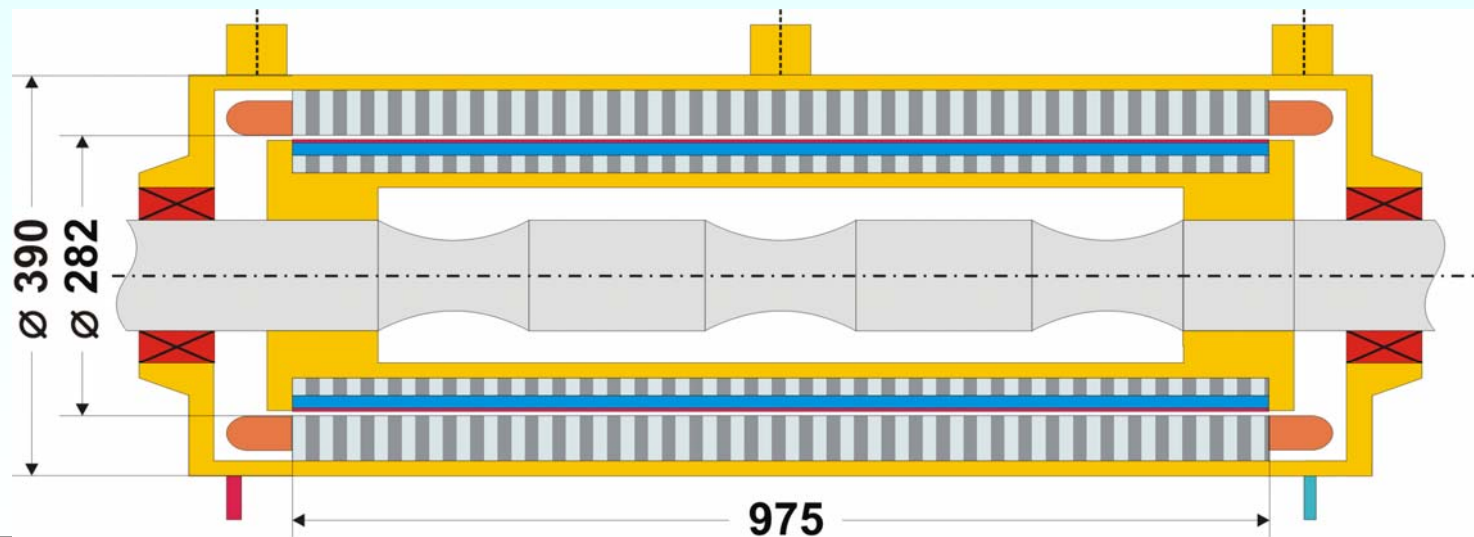
C) Beispiel: Vergleich zweier Zahnspulenwicklungen

Metrodirektantrieb mit PM-Synchronmaschine

Requirements:

- Rated power P_N : 250 kW
- Rated rotational speed n_N : 398 / min
- Maximum rotational speed n_{max} : 772 / min
- Rated torque M_N : 6000 Nm
- DC link voltage U_{dc} : 750 V

Main dimensions:



Winding Parameters for Motor 1 and Motor 2

Motor 1 ($q = 1/4$)

Motor 2 ($q = 1/2$)

• Number of poles $2p$:	28	28
• Number of slots per pole and phase q :	0.25	0.5
• Number of turns per coil N_c :	36	24
• Number of parallel paths a :	7	7
• Number of turns per phase N_s :	36	48
• Copper space factor per slot k_{ff} :	0.5	0.5
• Winding factor $k_{w,v=1}$:	0.997	0.866
• Resistance (at 150°C) per phase R_s :	52.9 mΩ	91.9 mΩ

Winding Factor for Motor 1 and Motor 2 (1)

Motor 1 ($q = 1/4$)

Motor 2 ($q = 1/2$)

$$k_{w,v} = k_{d,v} \cdot k_{p,v}$$

Winding factor = distribution factor • pitch factor

Number of slots per pole and phase: $q = \frac{z}{n}$

Ordinal numbers: $v = \frac{2}{n} \cdot (1 + m \cdot g)$

$\left\{ \begin{array}{l} z, n : \text{integer numbers} \\ n : \text{even} \\ g = 0, \mp 1, \mp 2, \mp 3 \dots \\ m = 3 \end{array} \right.$

Ordinal numbers v ($q = 1/4$):

Ordinal numbers v ($q = 1/2$):

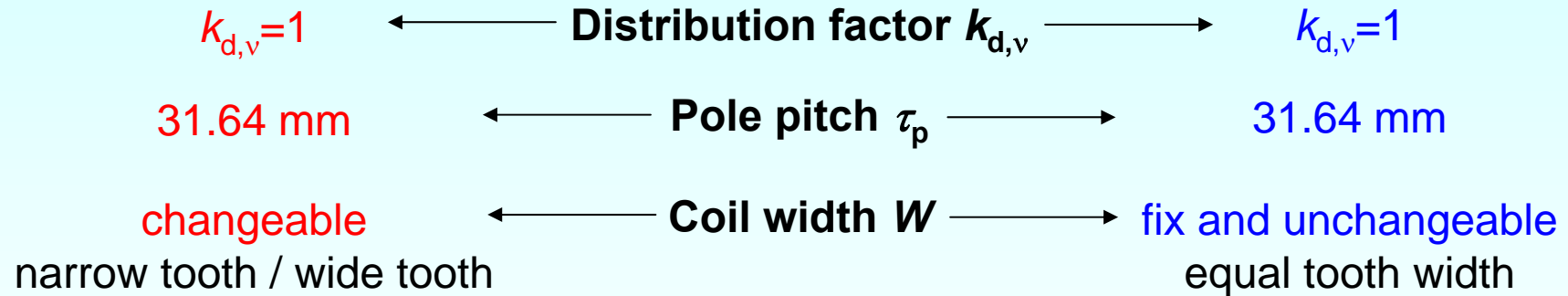
0.5	Subharmonic	0
- 1	Fundamental wave	1
2	Harmonics	- 2
- 2.5	...	0
+ 3.5		0
- 4 ...		4

Winding Factor for Motor 1 and Motor 2 (2)

$$k_{w,v} = k_{d,v} \cdot k_{p,v} \quad k_{d,v} = 1 \quad k_{p,v} = \sin\left(\frac{W}{\tau_p} \cdot \frac{\nu \cdot \pi}{2}\right)$$

Motor 1 ($q = 1/4$)

Motor 2 ($q = 1/2$)

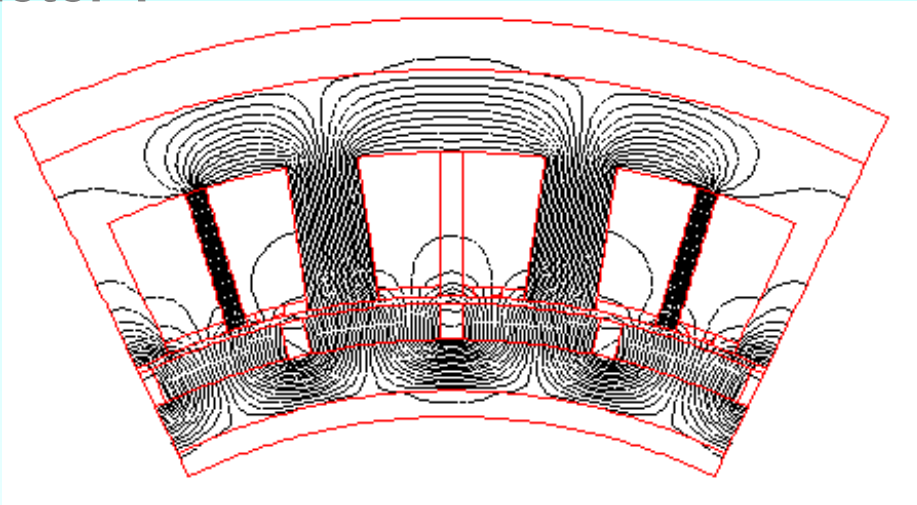


$\nu = 0.5: \quad k_{w,\nu=0.5} = 0.68$
 $\nu = 1: \quad k_{w,\nu=1} = 0.997$

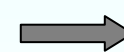
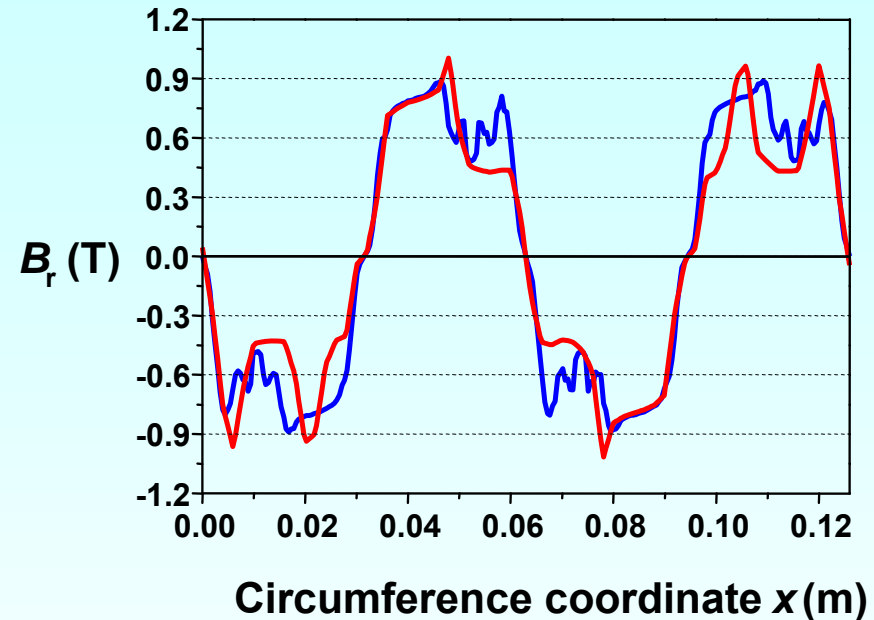
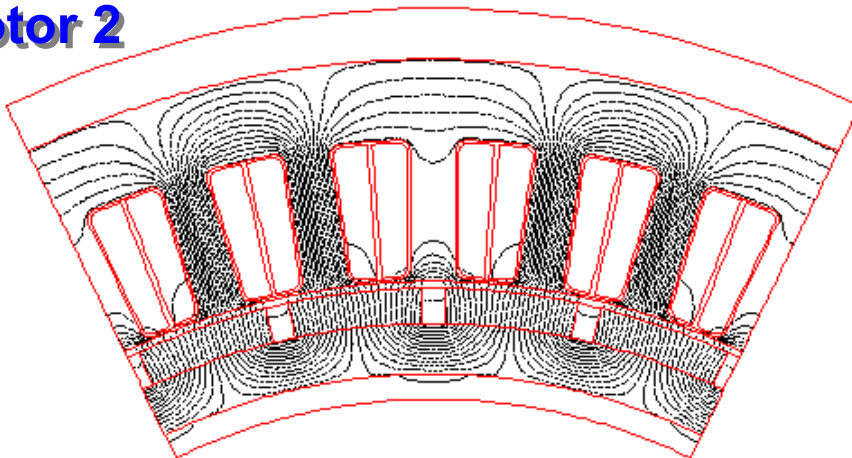
$\nu = 1: \quad k_{w,\nu=1} = 0.866$

Flux patterns of Motor 1 and Motor 2 at no-load operation

Motor 1

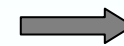


Motor 2



Motor 1:

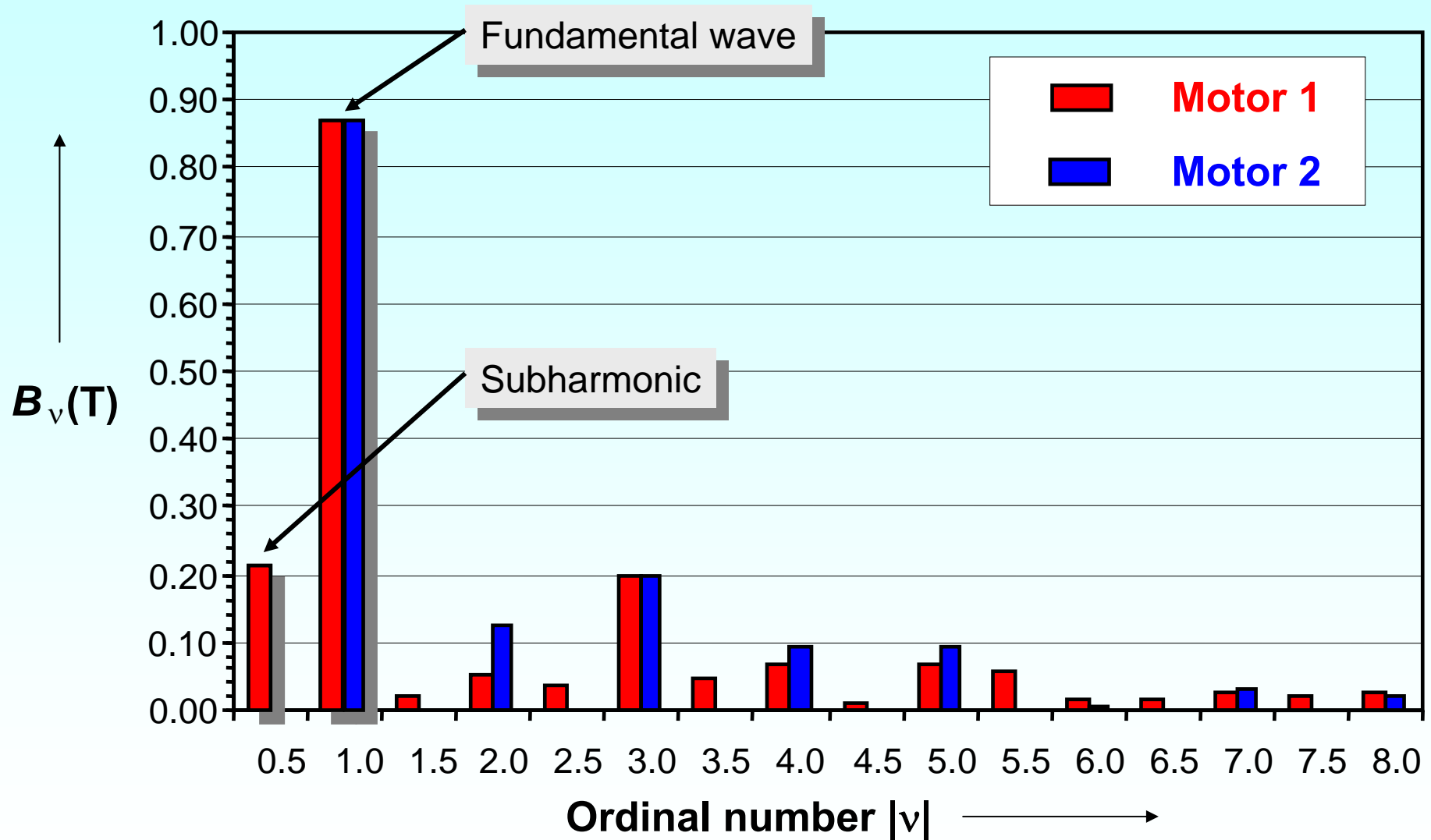
$$B_{r,v=1} = 0.88 \text{ T}$$



Motor 2:

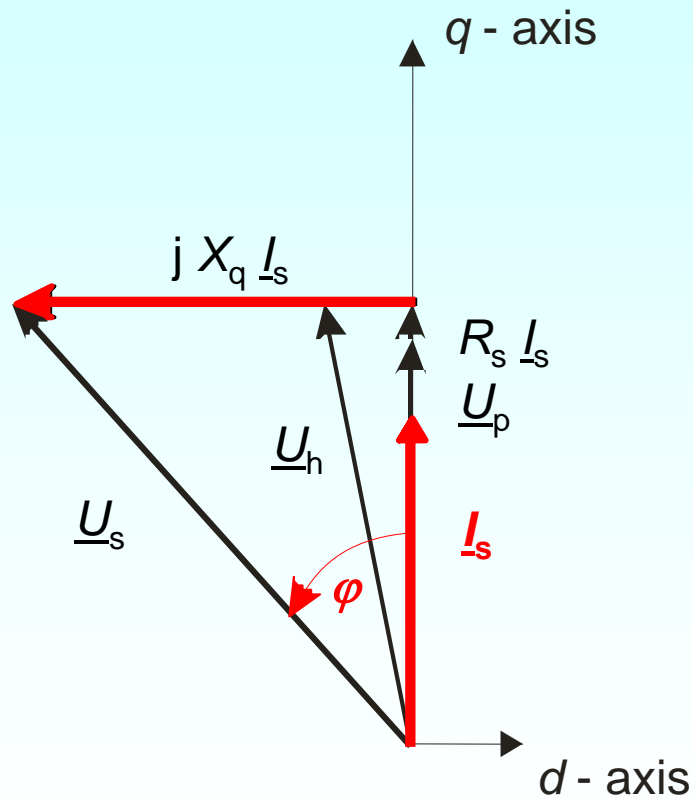
$$B_{r,v=1} = 0.88 \text{ T}$$

Fourier Spectrum of the flux density at rated speed

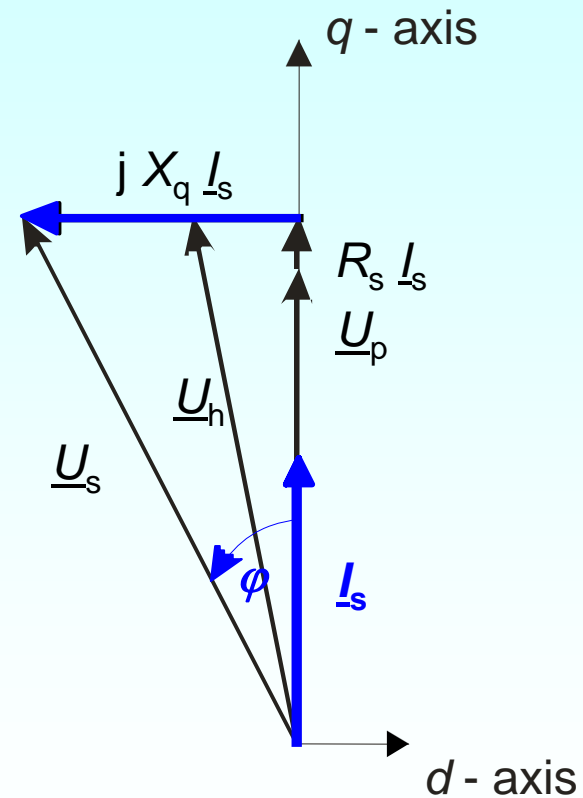


Phasor Diagrams of Motor 1 and Motor 2

Motor 1 ($q = 1/4$)

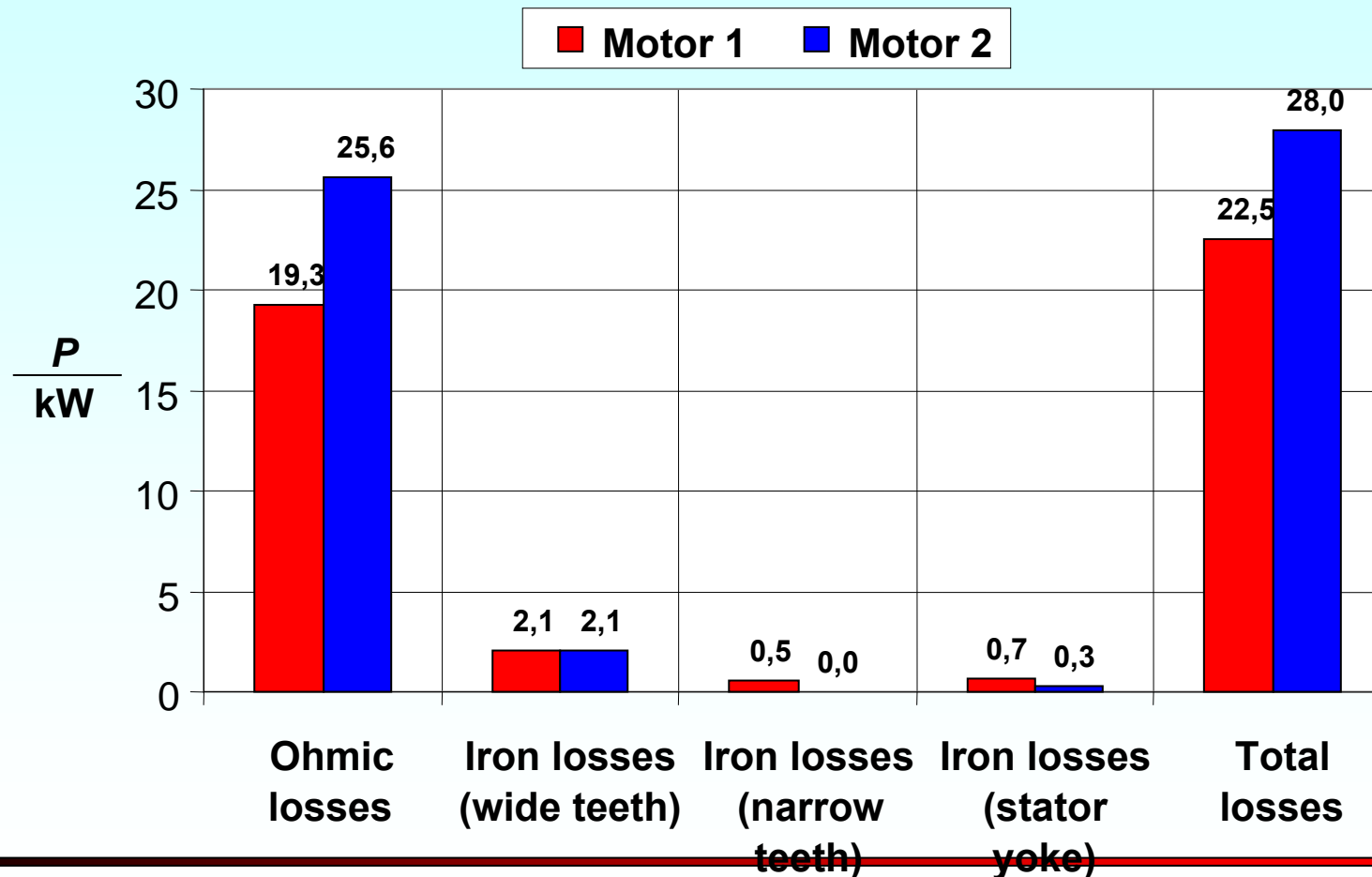


Motor 2 ($q = 1/2$)



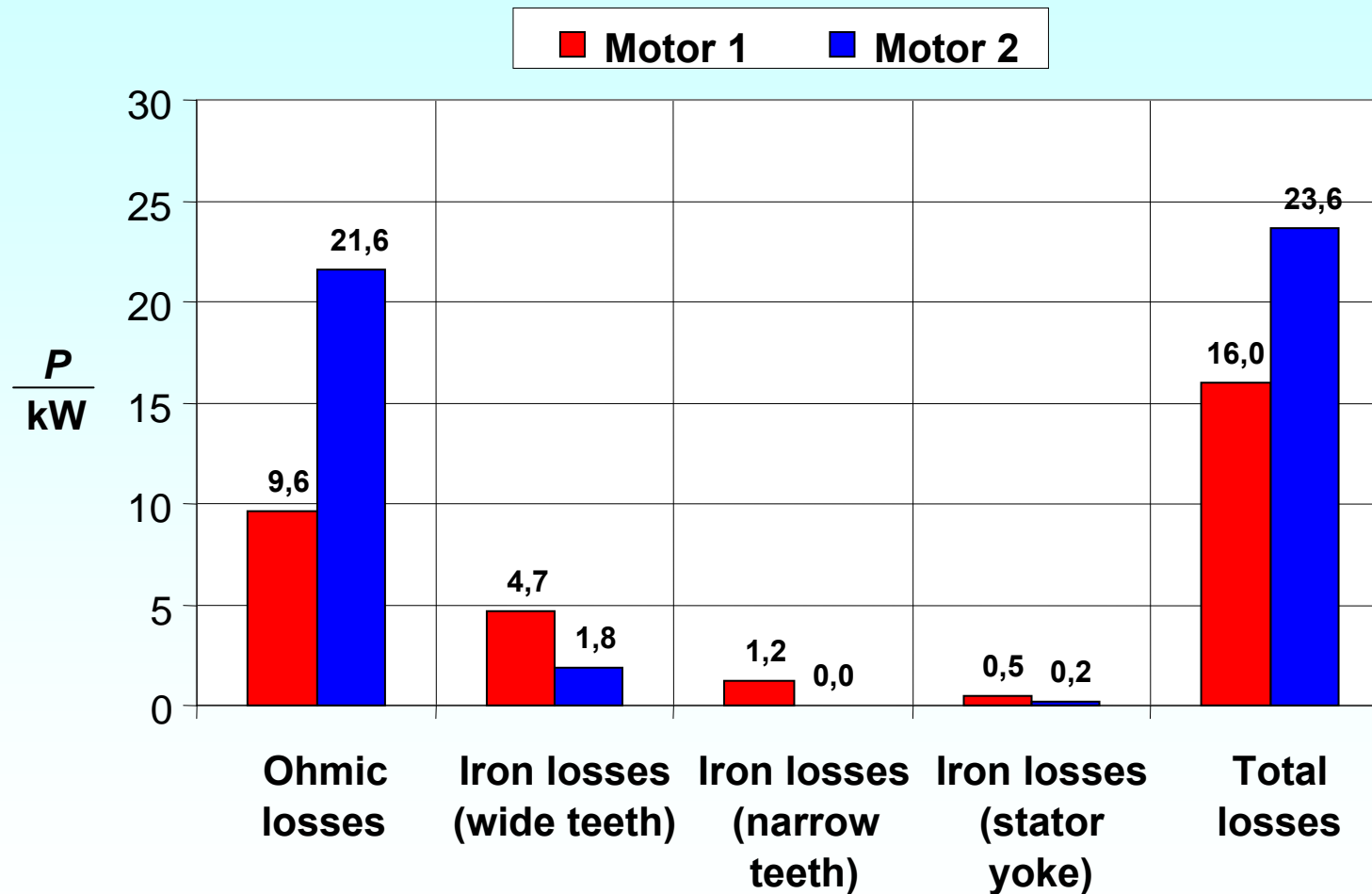
Calculated losses at sinusoidal supply at rated speed

$P = 250 \text{ kW}$; $n = 398 / \text{min}$; $M = 6000 \text{ Nm}$; $f = 93 \text{ Hz}$



Calculated losses at sinusoidal supply at maximum speed

$P = 250 \text{ kW}$; $n = 772 / \text{min}$; $M = 3094 \text{ Nm}$; $f = 180 \text{ Hz}$



Comparison of the results at rated / maximum speed

At rated speed and power

	($q=1/4$)	($q=1/2$)	
• Rated phase voltage $U_{1,N}$ /V:	338	338	0%
• Stator phase current $I_S=I_{sq}$ /A:	349 (-)	305	+ 15%
• Power factor $\cos \varphi$:	0.74 (-)	0.88	- 16%
• Thermal load A^*J /A/cm A/mm ² :	7952 (++)	10765	- 26%
• Efficiency η / %:	91.7 (+)	89.9	+ 2%

At maximum speed and rated power

	($q=1/4$)	($q=1/2$)	
• Rated phase voltage $U_{1,N}$ /V:	338	338	0%
• Stator phase current $I_S=I_s$ /A:	247 (+)	280	- 12%
• Power factor $\cos \varphi$:	0.99 (+)	0.88	+ 13%
• Thermal load A^*J / A/cm A/mm ² :	3982 (++)	9142	- 56%
• Efficiency η / %:	93.9 (+)	91.4	+ 3%

Benefits and Drawbacks of Motor 1 compared to Motor 2

- **Bigger total leakage inductance**

- ➔ Bigger inverter rating :
- ➔ Lower flux-weakening I_{sd} :

- **Bigger winding factor**

- ➔ Increased motor utilisation :

- **Subharmonic air gap wave**

- ➔ Additional oscillating torque :
- ➔ Additional radial oscillating forces :

- **Reduced phase resistance**

- ➔ Increased motor efficiency :
- ➔ Reduced thermal load :

	Motor 1	Motor 2
➔ Bigger inverter rating	(-)	(+)
➔ Lower flux-weakening I_{sd}	(+)	(-)
➔ Increased motor utilisation	(+)	(-)
➔ Additional oscillating torque	(-)	(+)
➔ Additional radial oscillating forces	(-)	(+)
➔ Increased motor efficiency	(+)	(-)
➔ Reduced thermal load	(+)	(-)

Vergleich Zahnspulenwicklung $q = 1/4$ und $q = 1/2$

Motor 1 ($q = 1/4$)

Motor 2 ($q = 1/2$)

Both machines meet the **requirements** given by space and power rating

➔ **Cost reduction** is possible by **round wire winding (tooth coils)** ←

➔ **Motor 1** has an increased calculated **efficiency** of about **2 - 3%**

➔ **Motor 1** has a considerably **lower thermal load**:

➔ **- 26%** at rated speed

➔ **- 56%** at maximum speed

➔ **Motor 1** requires a higher inverter **current rating of 15%** than **motor 2**