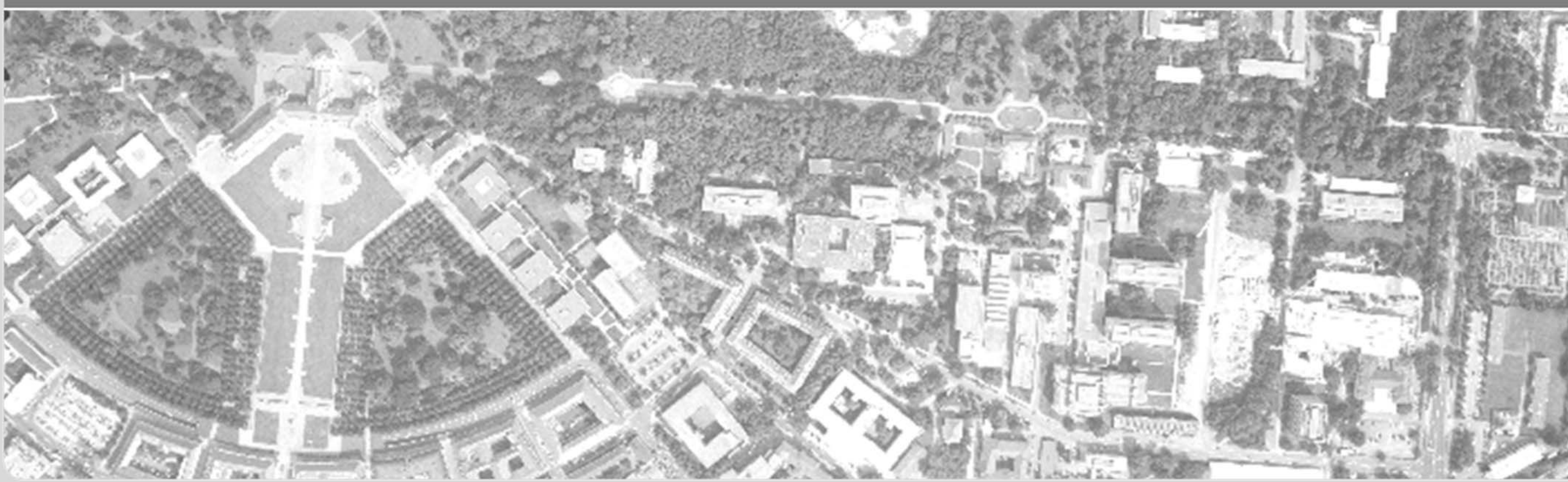
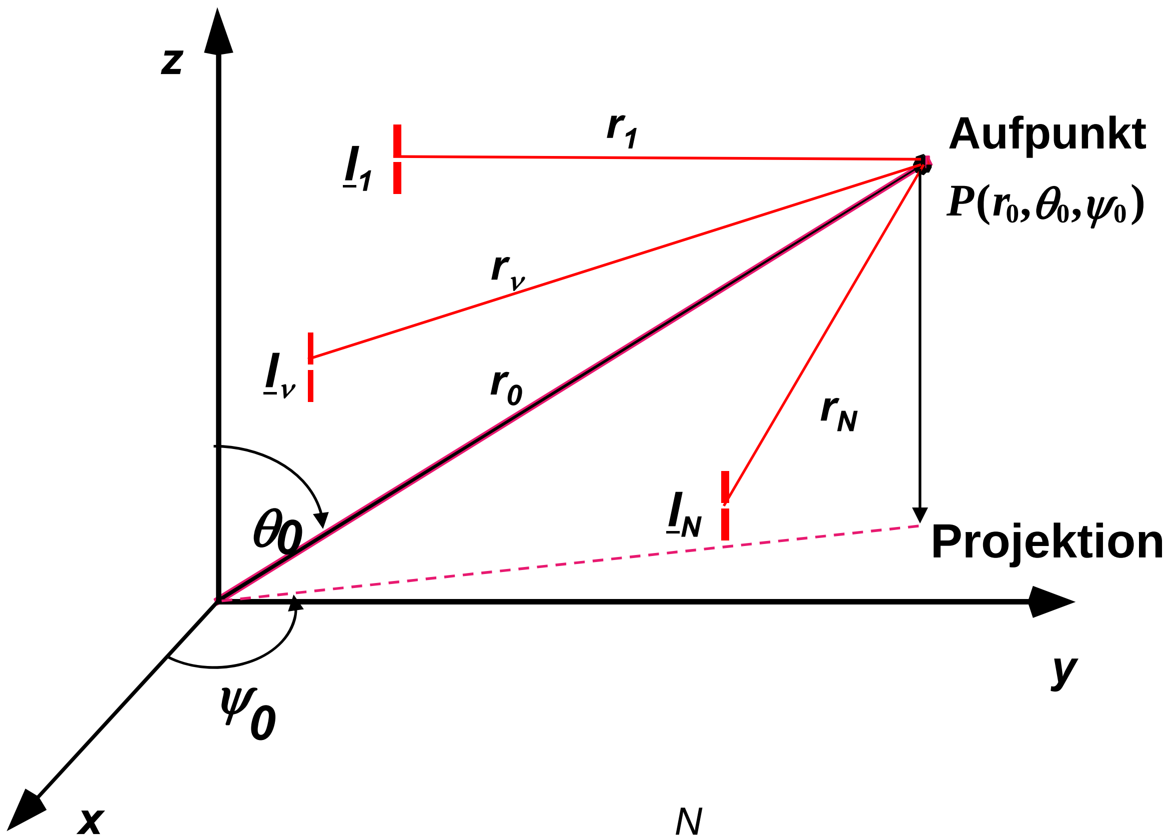
Antennen-Gruppen
(Antenna Arrays)

by Thomas Zwick

INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK UND ELEKTRONIK



Antennengruppe beliebiger Konfiguration



$$\underline{\vec{E}}_P = \sum_{\nu=1}^{N} \underline{\vec{E}}_\nu(r_\nu, \theta_\nu, \psi_\nu, \underline{I}_\nu)$$

Fernfeld einer Antennengruppe

$$E_p = \sum_{v=1}^{N} E_v\left(r_v,\theta_v,\psi_v,I_v\right)$$

$$E_p = \sum_{v=1}^{N} E\left(r_v,\theta_v,\psi_v,I_v\right)$$

$$E_p = \sum_{v=1}^{N} I_v E'\left(r_v,\theta_v,\psi_v\right)$$

$$E_p = \sum_{v=1}^{N} I_v E''\left(\theta_0,\psi_0\right)\frac{e^{-j\beta_0 r_v}}{r_0}$$

- Alle Einzelstrahler sind identisch, im Raum gleich orientiert und beeinflussen sich nicht
- Feldstärke des Einzelelements linear proportional zu Speisestrom
- Betrachtung im Fernfeld
- Gruppenfaktor: Richtcharakteristik einer identischen Anordnung von Isotropen Kugelstrahlern

$$E_p = \underbrace{E''\left(\theta_0,\psi_0\right)I_0}_{\text{Elementfaktor } F_E} \cdot \underbrace{\frac{e^{-j\beta_0 r_0}}{r_0}}_{\text{Abstandsfaktor } F_A} \cdot \underbrace{\sum_{v=1}^{N}\frac{I_v}{I_0}e^{-j\beta_0\left(r_v-r_0\right)}}_{\text{Gruppenfaktor } F_{Gr}}$$

Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Fernfeld einer Antennengruppe

$$\underline{\vec{E}}_P = \underbrace{\underline{\vec{E}}''(\theta_0,\psi_0)\underline{I}_0}_{F_E} \cdot \underbrace{\frac{e^{-j\beta_0 r_0}}{r_0}}_{F_A} \cdot \underbrace{\sum_{\nu=1}^{N} \frac{\underline{I}_\nu}{\underline{I}_0} e^{-j\beta_0 (r_\nu - r_0)}}_{F_G}$$

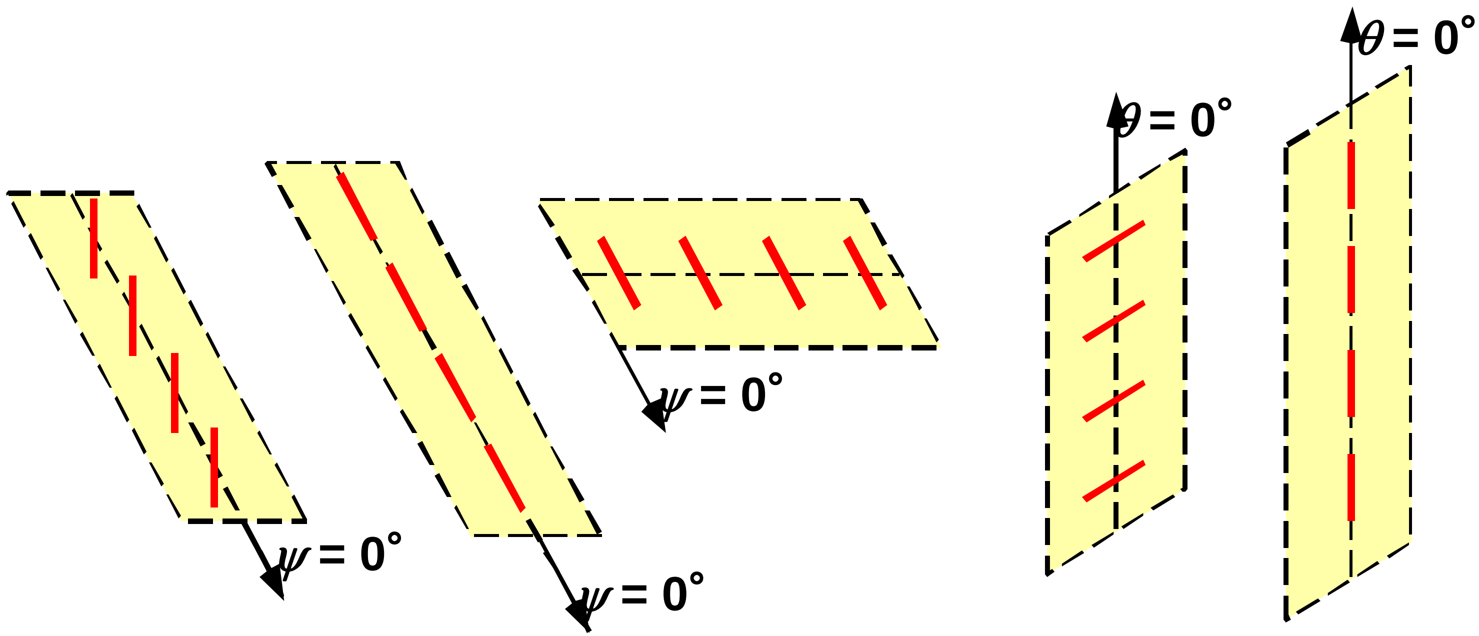
F_E = Elementfaktor

F_A = Abstandsfaktor

F_G = Gruppenfaktor

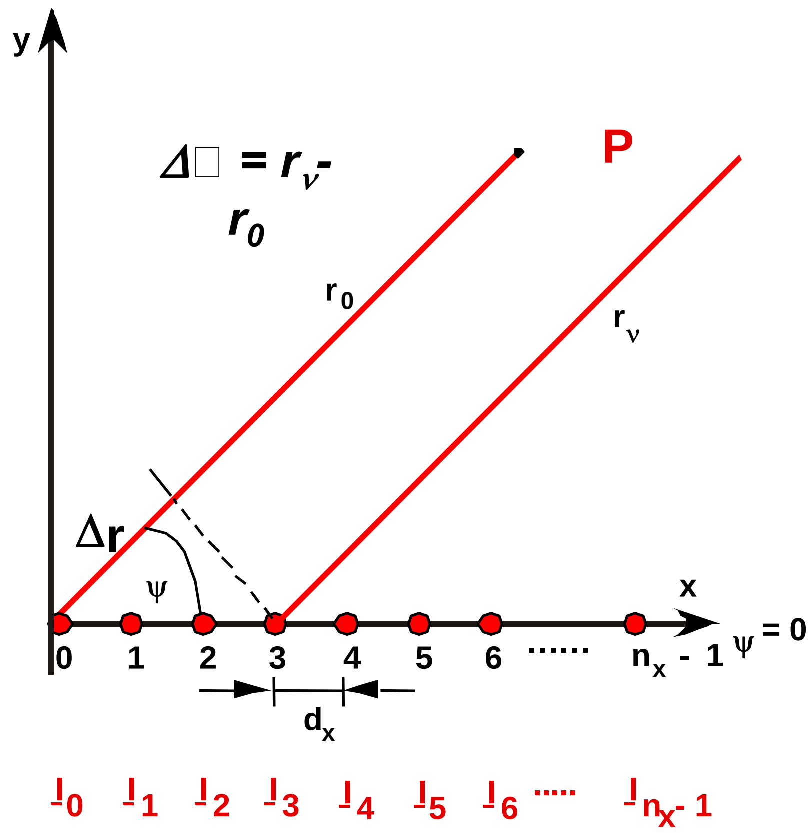
Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Anordnung von Dipolen in Zeilen und Spalten



Anordnung zur Berechnung des Gruppenfaktors

Karlsruhe Institute of Technology



- ✓ gleiche Antennenelemente
- ✓ gleicher Speisestrom $|I_\nu|=|I_0|$
- ✓ gleiche gegenseitige Phasen- verschiebung $I_{\nu+1}/I_\nu=e^{-j\varphi_{0x}}$
- ✓ gleicher gegenseitiger Abstand d_x
- ✓ keine gegenseitige Beeinflussung der Einzelstrahler

Berechnung lineare Antennengruppe

$$F_{Gr} = \sum_{v=0}^{n_x-1} e^{-jv\varphi_{0x}} e^{-j\beta_0 (r_v - r_0)} \qquad r_v - r_0 = -v d_x \cos\psi \sin\theta$$

$$F_{Gr} = \sum_{v=0}^{n_x-1} e^{+j(\beta_0 v d_x \cos\psi \sin\theta - v\varphi_{0x})} = \sum_{v=0}^{n_x-1} \left(e^{+j\delta}\right)^v \qquad \delta = \beta_0 d_x \cos\psi \sin\theta - \varphi_{0x}$$

$$F_{Gr} = \frac{1 - e^{+jn_x\delta}}{1 - e^{+j\delta}} = \frac{e^{+jn_x\frac{\delta}{2}}}{e^{+j\frac{\delta}{2}}} \cdot \frac{e^{-jn_x\frac{\delta}{2}} - e^{+jn_x\frac{\delta}{2}}}{e^{-j\frac{\delta}{2}} - e^{+j\frac{\delta}{2}}} = \frac{e^{+jn_x\frac{\delta}{2}}}{e^{+j\frac{\delta}{2}}} \cdot \frac{-2j\sin\left(n_x\frac{\delta}{2}\right)}{-2j\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}$$

$$\left|F_{Gr}\right| = \left| \frac{\sin\left\{\frac{n_x}{2}\left(\beta_0 d_x \cos\psi \sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}}{\sin\left\{\frac{1}{2}\left(\beta_0 d_x \cos\psi \sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}} \right|$$

Geometrische Reihe:

$$\sum_{i=0}^{n-1} a^i = \frac{1-a^n}{1-a}$$

Gruppenfaktor von Linearem Array

Fernfeld der Antennengruppe:

$$\underline{\vec{E}}_P = \underbrace{\underline{\vec{E}}''(\theta_0,\psi_0)\underline{I}_0}_{F_E} \cdot \underbrace{\frac{e^{-j\beta_0 r_0}}{r_0}}_{F_A} \cdot \underbrace{\sum_{\nu=1}^{N} \frac{\underline{I}_\nu}{\underline{I}_0} e^{-j\beta_0(r_\nu - r_0)}}_{F_G}$$

Lineares Array:

$$F_{Gr} = \sum_{\nu=0}^{n_x-1} e^{+j(\beta_0 \nu d_x \cos\psi \sin\theta - \nu\varphi_{0x})}$$

$$\left|F_{Gr}\right| = \left| \frac{\sin\left\{\frac{n_x}{2}(\beta_0 d_x \cos\psi \sin\theta - \varphi_{0x})\right\}}{\sin\left\{\frac{1}{2}(\beta_0 d_x \cos\psi \sin\theta - \varphi_{0x})\right\}} \right|$$

- ✓ **gleiche Antennenelemente**
- ✓ **gleicher Speisestrom $|I_\nu|=|I_0|$**
- ✓ **gleiche gegenseitige Phasen-verschiebung $I_{\nu+1}/I_\nu = e^{-j\varphi_{0x}}$**
- ✓ **gleicher gegenseitiger Abstand d_x**
- ✓ **keine gegenseitige Beeinflussung der Einzelstrahler**

Maximum von:

$$\left|F_{Gr}\right| = \frac{\sin\left(n_x \frac{\delta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}$$

Wert bei δ=0 -> Taylor-Reihenentwicklung:

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \ldots$$

Maximaler Gewinn:

$$\left|F_{Gr}\right|_{\max} = n_x$$

Horizontaldiagramm lineare Antennengruppe

Nur Horizontaldiagramm:

$$\left|F_{Gr}(\theta = 90°, \psi)\right| = \left| \frac{\sin\left\{\frac{n_x}{2}\left(\beta_0 d_x \cos\psi - \varphi_{0x}\right)\right\}}{\sin\left\{\frac{1}{2}\left(\beta_0 d_x \cos\psi - \varphi_{0x}\right)\right\}} \right|$$

Hauptstrahlung:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos\psi - \varphi_{0x}\right) = m\pi \qquad m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$$

$$\text{erstes Maximum: } m = 0 \quad \& \quad 0 \le \varphi_{0x} \le 2\pi \qquad \text{mit } \left|F_{Gr}(\psi_{H0})\right| = n_x$$

$$\psi_{H0} = \arccos\frac{\varphi_{0x}\lambda}{2\pi d_x} \qquad \text{weitere Hauptstrahlrichtungen für } \frac{d_x}{\lambda} \ge 1$$

Nullstellen:

$$\frac{n_x}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_x \cos\psi - \varphi_{0x}\right) = m\pi \qquad m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad \frac{m}{n_x} \ne \text{ganzzahlig} \qquad \psi_{01} = \pm\arccos\frac{\frac{2\pi}{n_x} + \varphi_{0x}}{2\pi\frac{d_x}{\lambda}}$$

Zusammenfassung Lineare Arrays

$$G_{Gr} = n_x$$

$$G_{ges} = n_x G_E$$

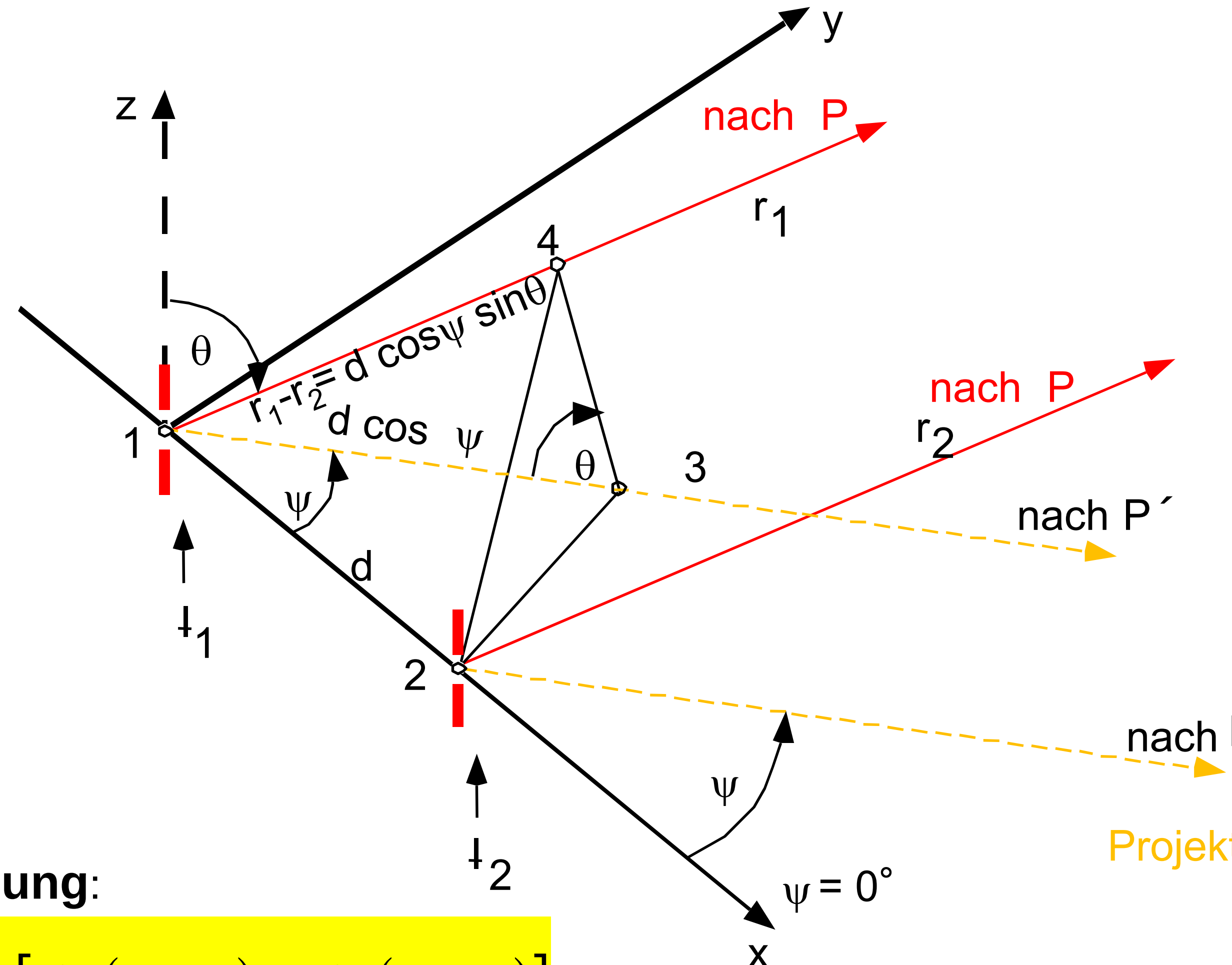
$$C_{Gr}(\theta,\psi) = \frac{|F_{Gr}(\theta,\psi)|}{|F_{Gr}(\theta,\psi)|_{\max}} = \frac{|F_{Gr}(\theta,\psi)|}{n_x}$$

$$C_{ges}(\theta,\psi) = C_E(\theta,\psi) \cdot C_{Gr}(\theta,\psi)$$

- ✓ gleiche Antennenelemente
- ✓ gleicher Speisestrom $|I_\nu|=|I_0|$
- ✓ gleiche gegenseitige Phasen-Verschiebung $I_{\nu+1}/I_\nu=e^{-j\varphi_{0x}}$
- ✓ gleicher gegenseitiger Abstand d_x
- ✓ keine gegenseitige Beeinflussung der Einzelstrahler

Verdopplung der Anzahl der Elemente ergibt +3dB Gewinn!

Zwei parallele Dipole



Formelsammlung:

$$\sin x \cos y = \frac{1}{2}\left[\sin(x-y)-\sin(x+y)\right]$$

Berechnung für zwei Hertz ‘sche Dipole

$$\left|C_{Gr}(\theta,\psi)\right| = \frac{\left|F_{Gr}(\theta,\psi)\right|}{2} = \frac{1}{2}\left|\frac{\sin\left\{\frac{2}{2}\left(\beta_0 d_x \cos\psi \sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}}{\sin\left\{\frac{1}{2}\left(\beta_0 d_x \cos\psi \sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}}\right| = \left|\cos\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\cos\psi\sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}\right|$$

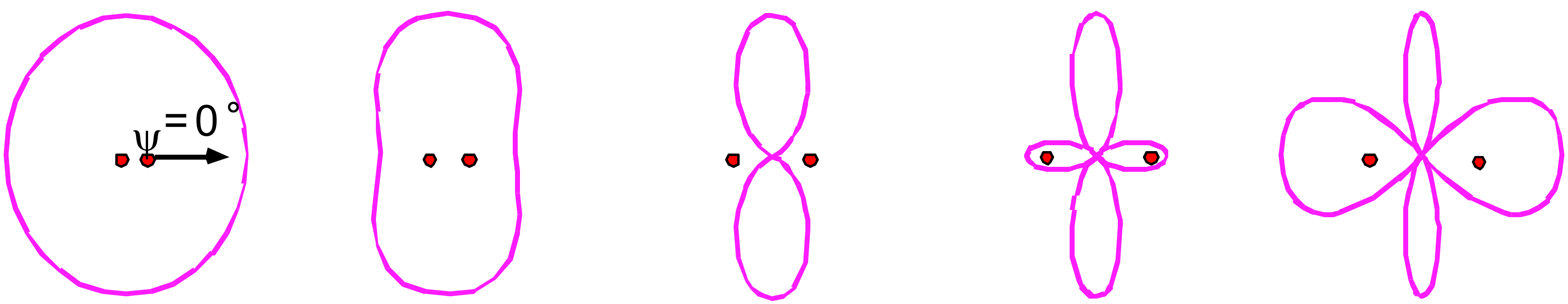
$$\sin x \cos x = -\frac{1}{2}\sin 2x \quad \Rightarrow \quad \cos x = -\frac{1}{2}\frac{\sin 2x}{\sin x}$$

$$\left|C_{ges}\right| = \left|C_E\right| \cdot \left|C_{Gr}\right| = \left|\sin\theta\right| \cdot \left|\cos\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\cos\psi\sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}\right|$$

Horizontaldiagramm 2er gleichphasiger Stabantennen;

$$C_{ges}(\theta,\psi) = \left|\sin\theta\right| \cdot \left|\cos\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\cos\psi\sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}\right|$$

$$\varphi_{0x} = 0^\circ$$

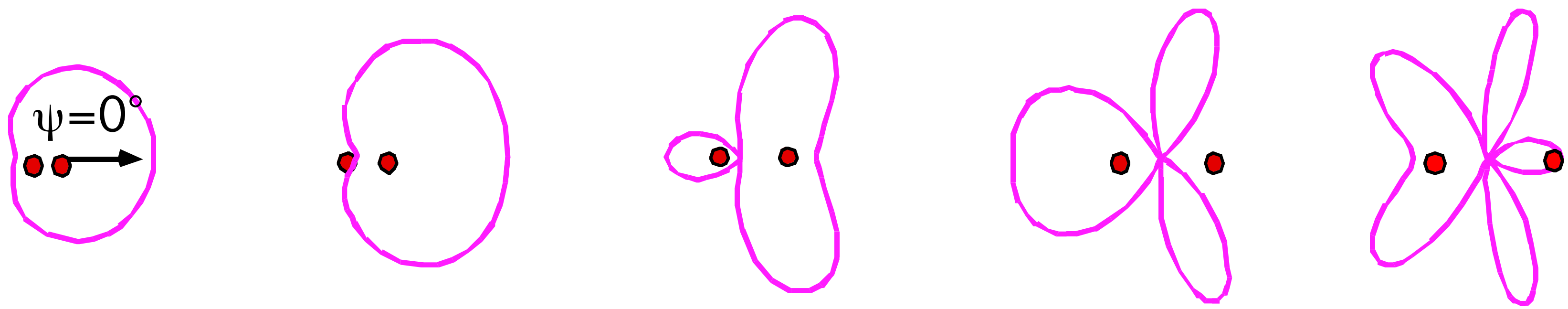


$d = \lambda/10$ $d = \lambda/4$ $d = \lambda/2$ $d = 3\lambda/4$ $d = \lambda$

Horizontaldiagramm zweier Stabantennen

$$C_{ges}(\theta,\psi) = |\sin\theta| \cdot \left|\cos\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\cos\psi\sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}\right|$$

Speisestrom des rechten Stabstrahlers eilt 90° nach; $\varphi_{0x} = 90°$



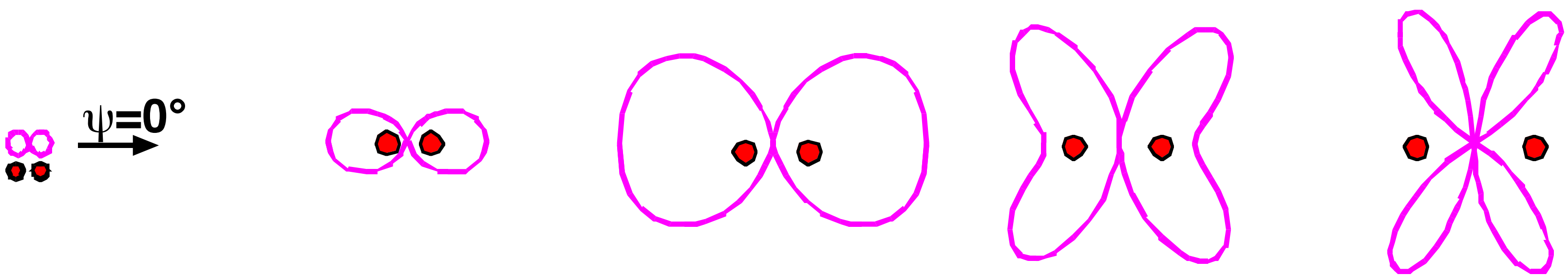
$d = \lambda/10$ $\quad d = \lambda/4$ $\quad d = \lambda/2$ $\quad d = 3\lambda/4$ $\quad d = \lambda$

Horizontaldiagramm zweier Stabantennen

Karlsruhe Institute of Technology

$$C_{ges}(\theta,\psi) = \left|\sin\theta\right| \cdot \left|\cos\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\cos\psi\sin\theta - \varphi_{0x}\right)\right\}\right|$$

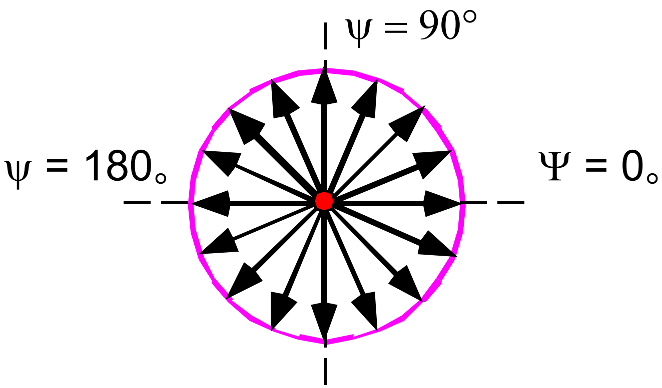
mit gegen-phasiger Speisung; φ_{0x} = 180°



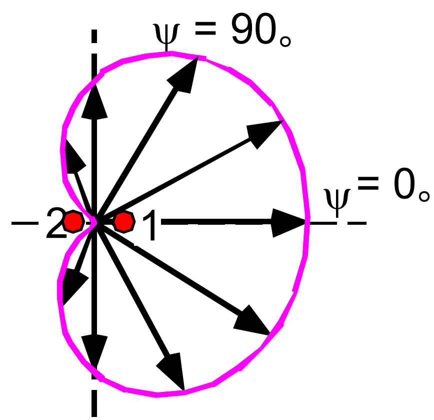
$d = \lambda/10$ $d = \lambda/4$ $d = \lambda/2$ $d = 3\lambda/4$ $d = \lambda$

Zwei parallele Dipole, $d_x/\square = 0{,}25$; $\square_{0x} = 90^\circ$

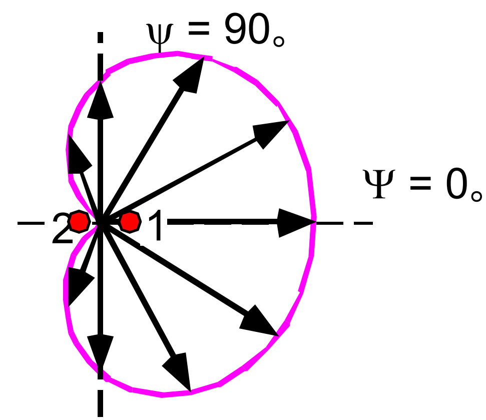
Elementfaktor



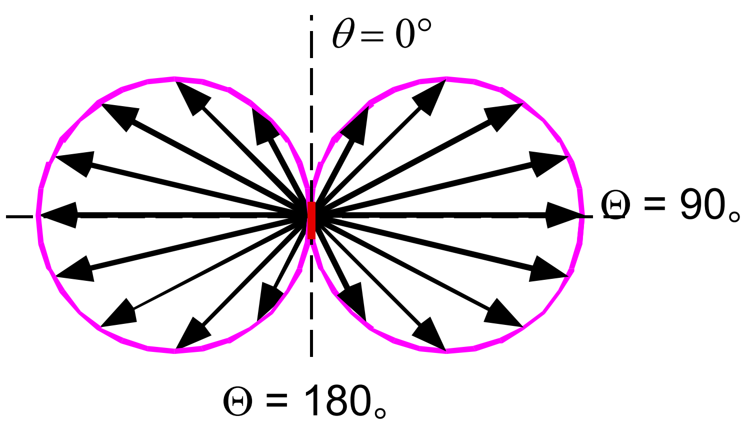
Gruppenfaktor



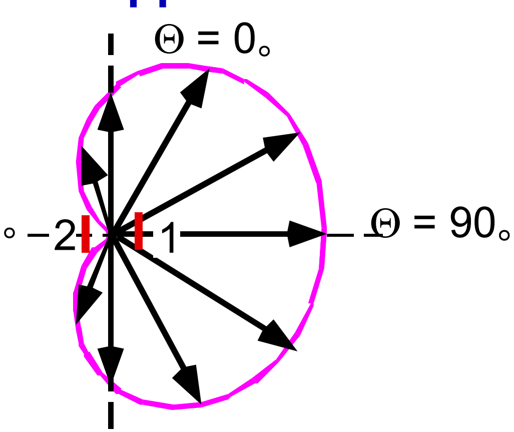
Array Horizontaldiagramm



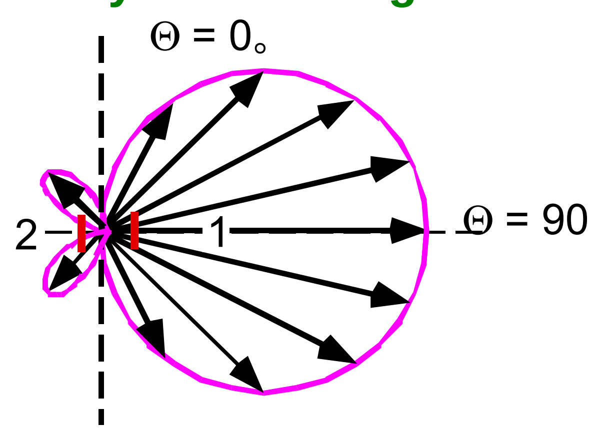
Elementfaktor



Gruppenfaktor

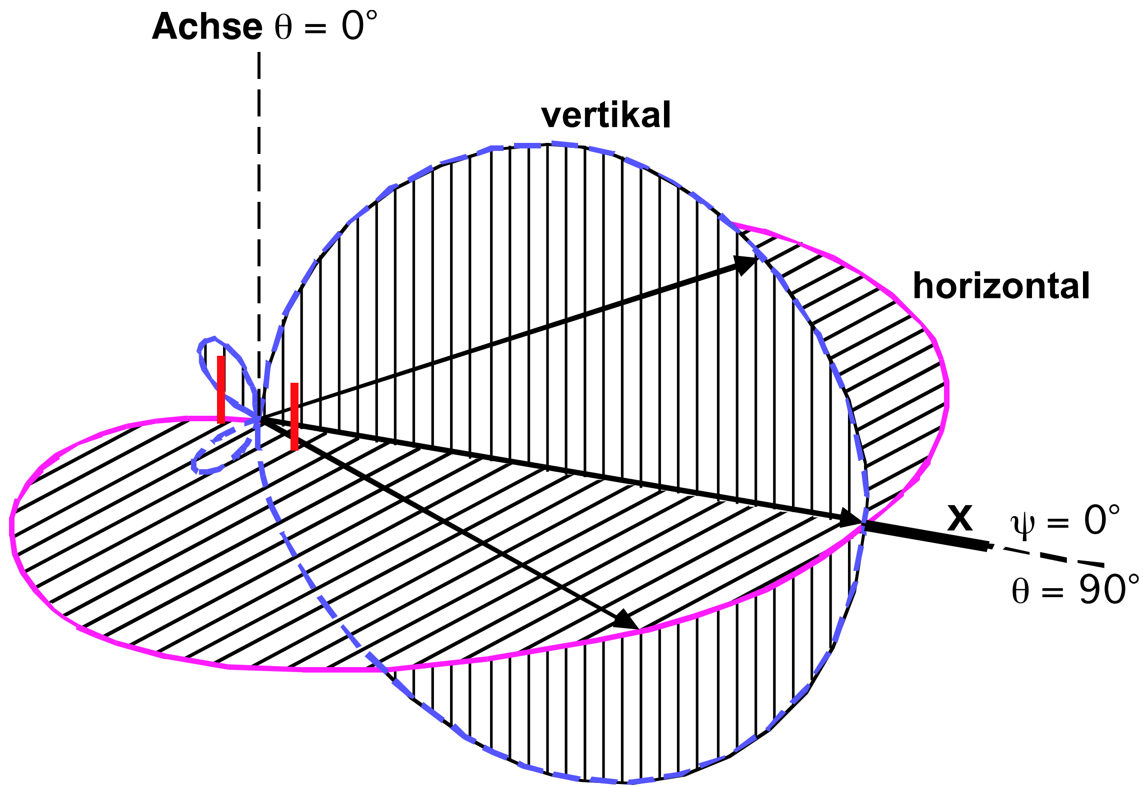


Array Vertikaldiagramm

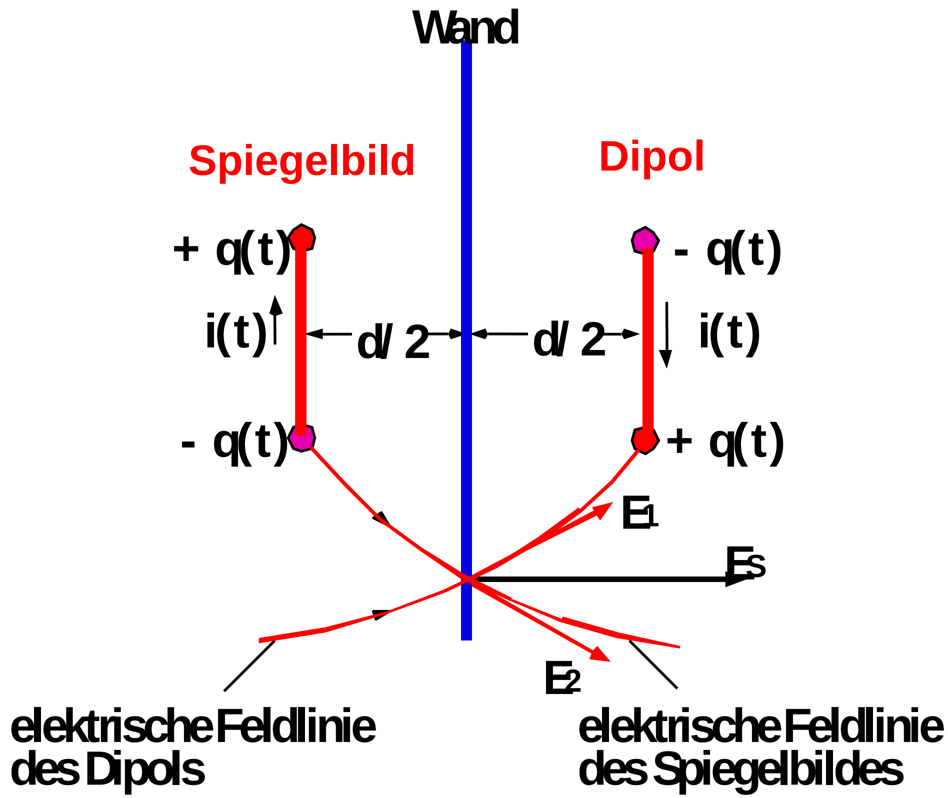


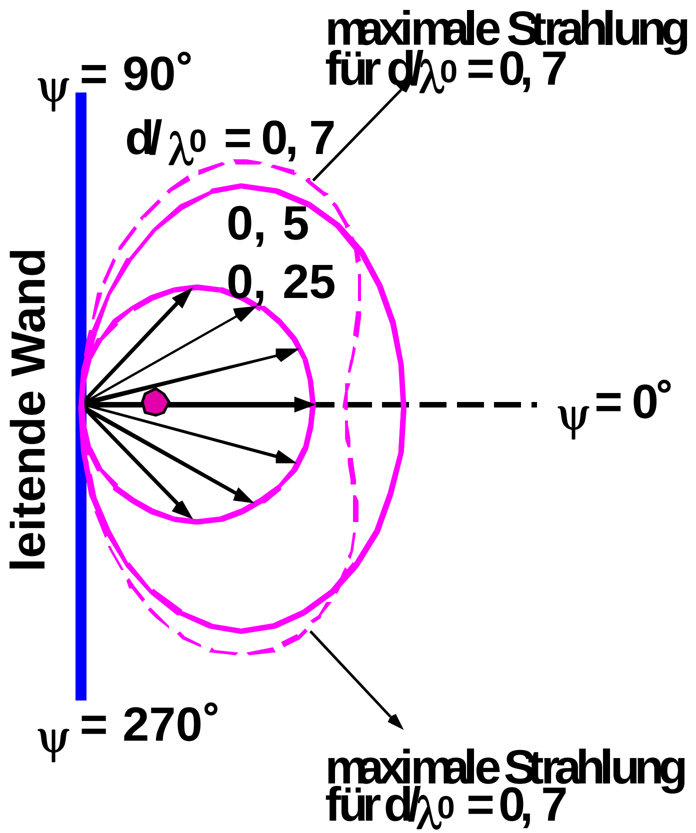
Richtdiagramm zweier paralleler Dipole,

$d_x/\lambda = 0{,}25;\ \varphi_{0x} = 90^\circ$



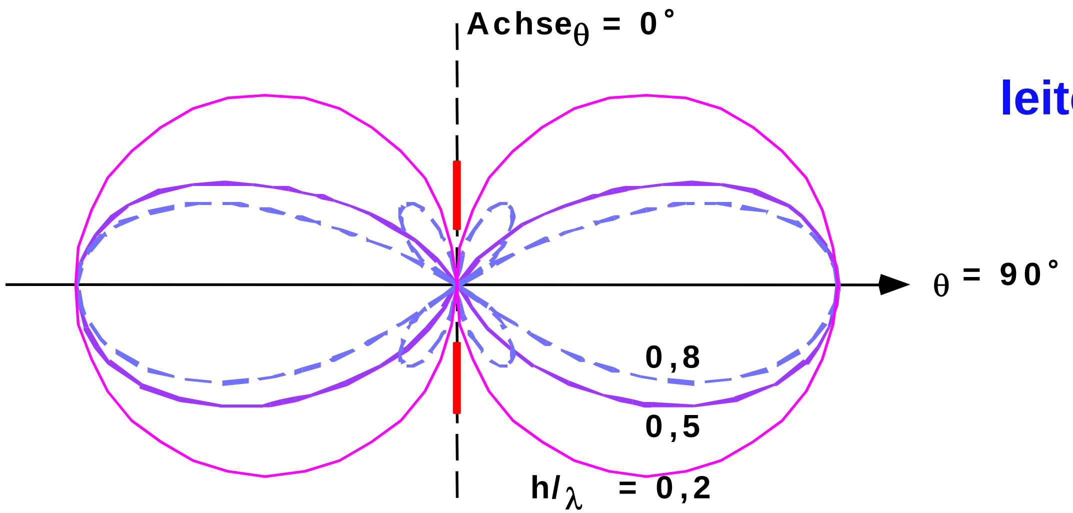
Dipol vor einer leitenden Wand



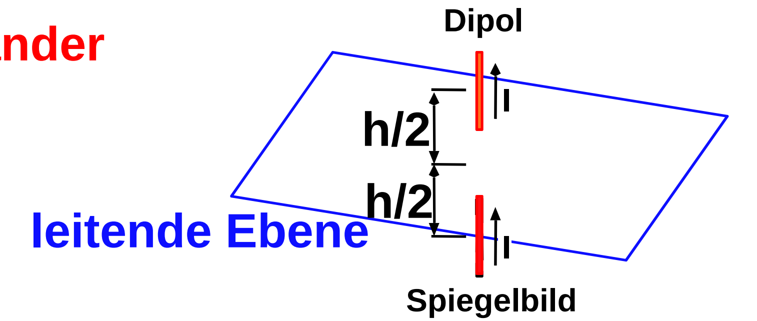


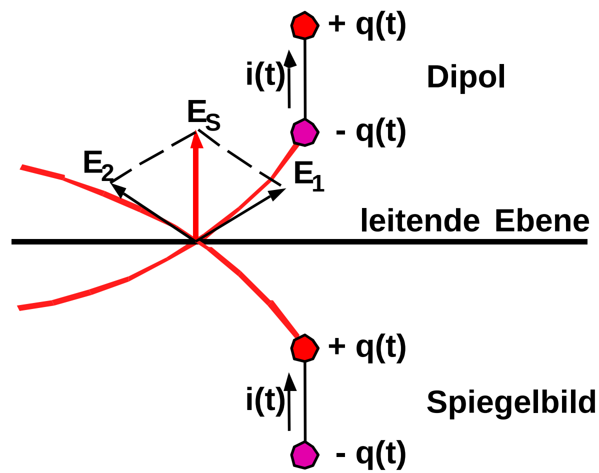
Zwei Dipole übereinander

Vertikaldiagramm zweier Dipole übereinander



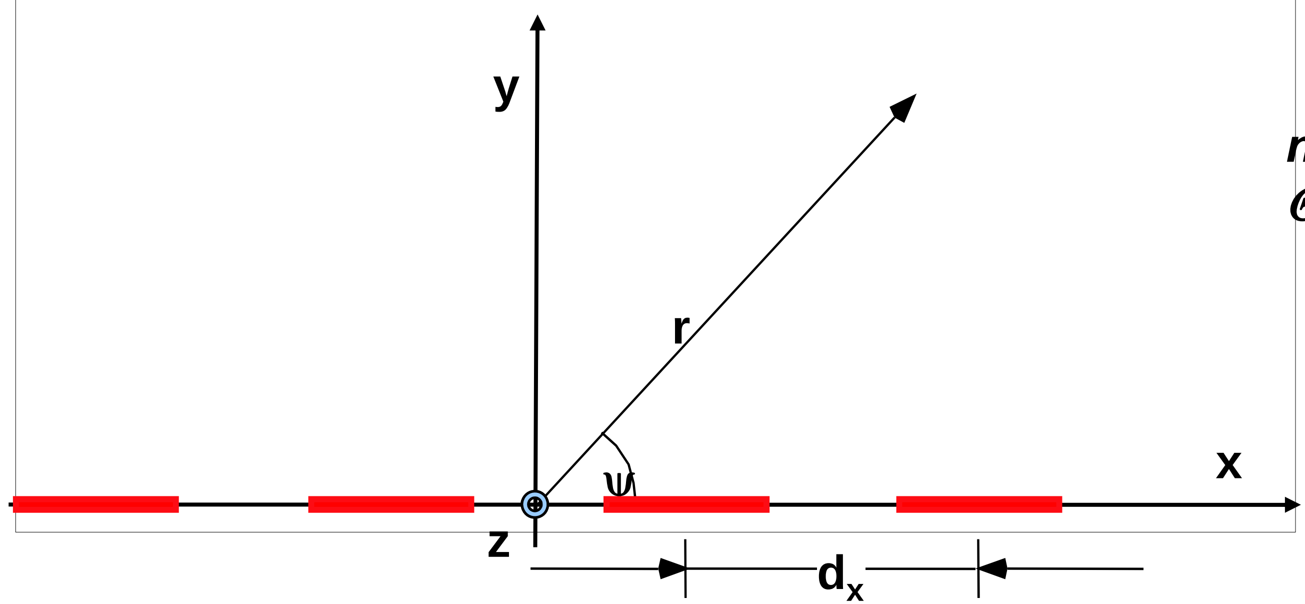
Dipol über leitender Wand





Lineare Anordnung von 4 Hertz ‘schen Dipolen

$$C_{ges}(\theta,\psi) = |\sin\psi| \cdot \left|\frac{F_{Gr}(\theta,\psi)}{n_x}\right| = |\sin\psi| \cdot \frac{\left|\sin\left\{2\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\cos\psi - \varphi_{0x}\right)\right\}\right|}{\left|4\sin\left\{\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d_x}{\lambda}\cos\psi - \varphi_{0x}\right)\right\}\right|}$$

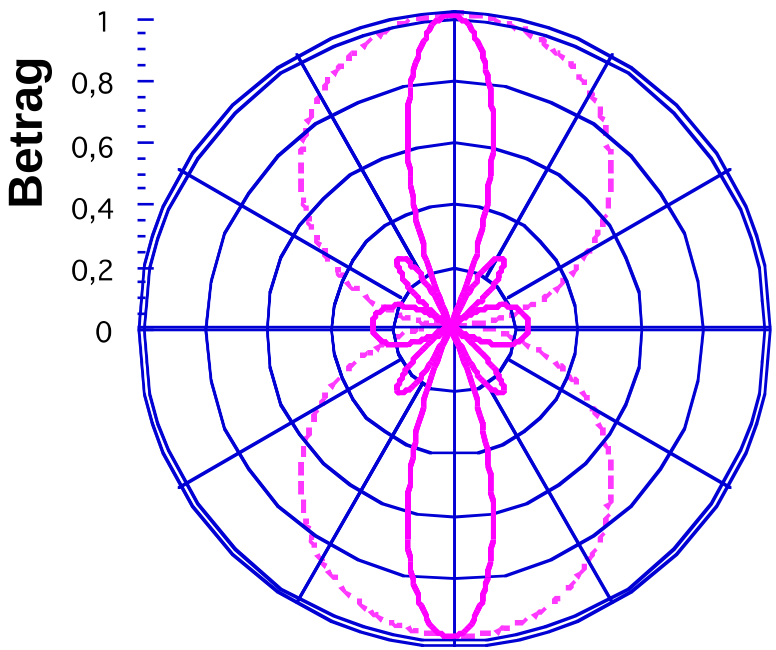


$n_x = 4$

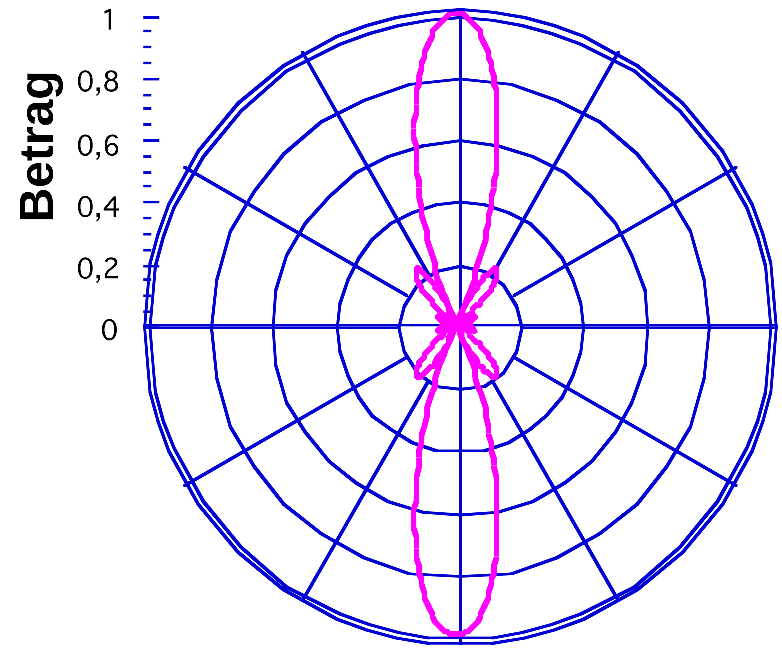
$\Theta = 90°$

Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Dipolzeile $n_x = 4$ bei konstantem Elementabstand und Horizontaldiagramm Gruppenfaktor, $\varphi_{ox} = 0°$, $d_x/\lambda = 0,6$

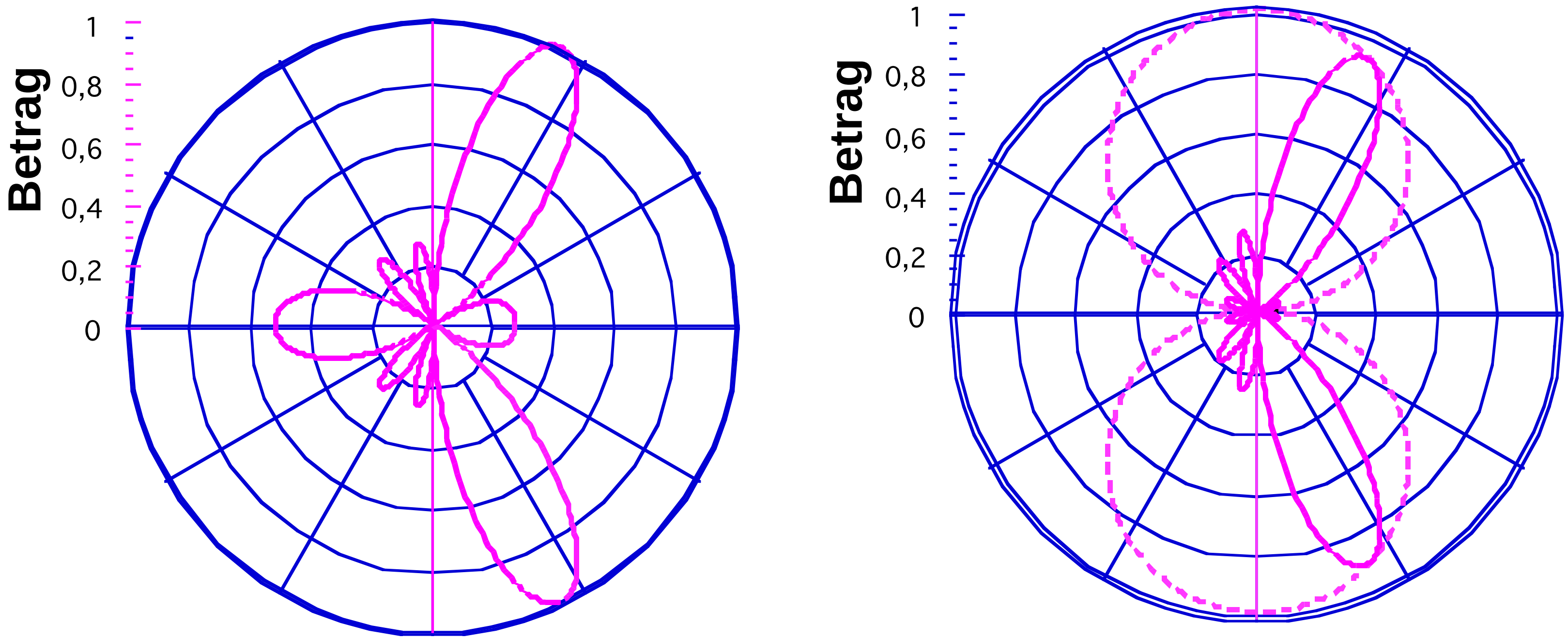


Gruppen C_{Gr} und Element C_E



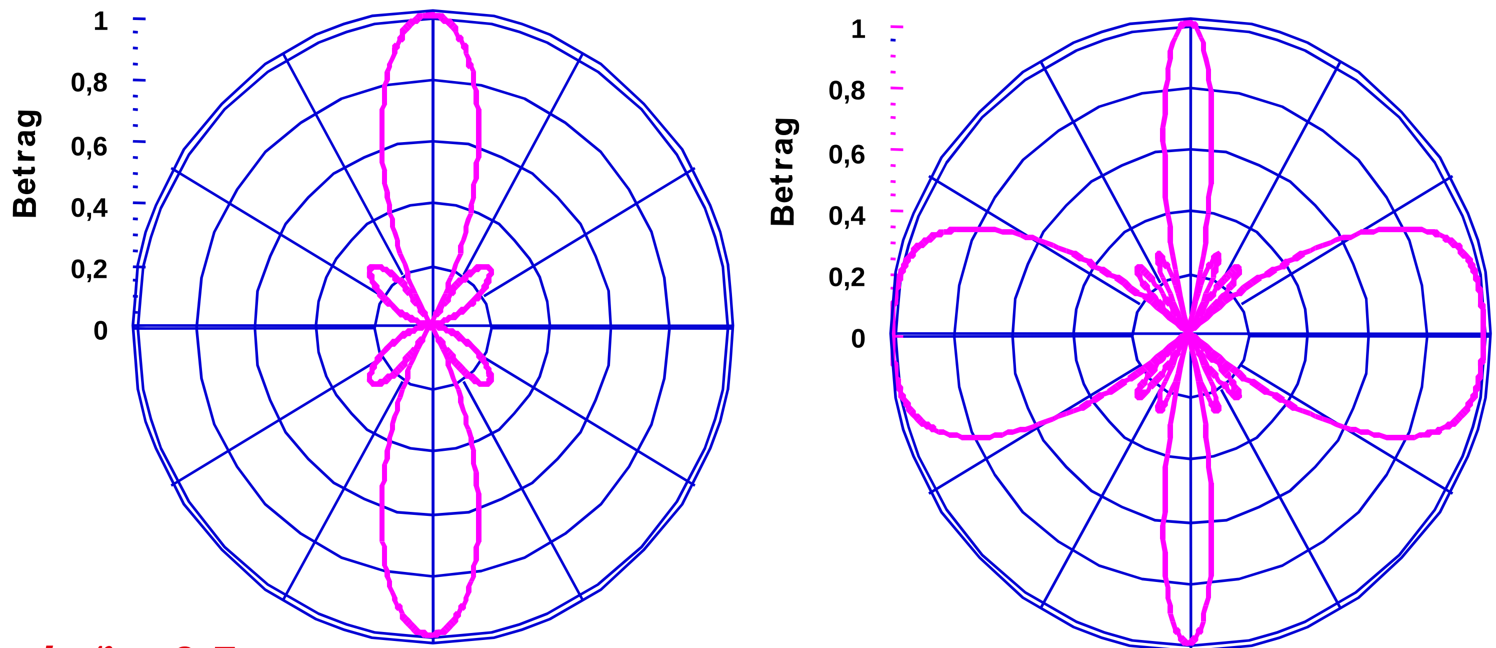
C_{ges}

Dipolzeile $n_x = 4$ bei konstantem Elementabstand und Horizontaldiagramm Gruppenfaktor, $\varphi_{ox} = 90°$, $d_x/\lambda = 0{,}6$



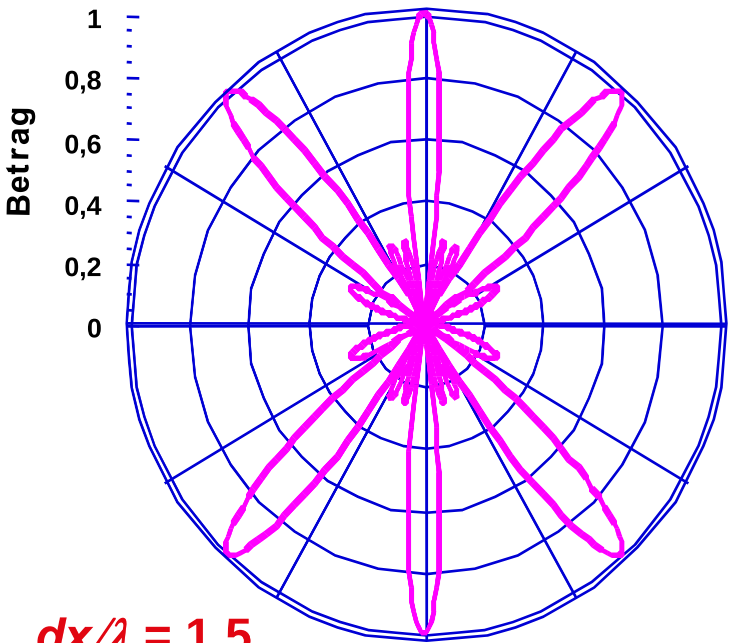
Gruppen C_{Gr} | **C_{ges} und Element C_E**

Gruppenfaktor bei homogener Phasenbelegung und Variation des Elementabstandes (4 Elemente)

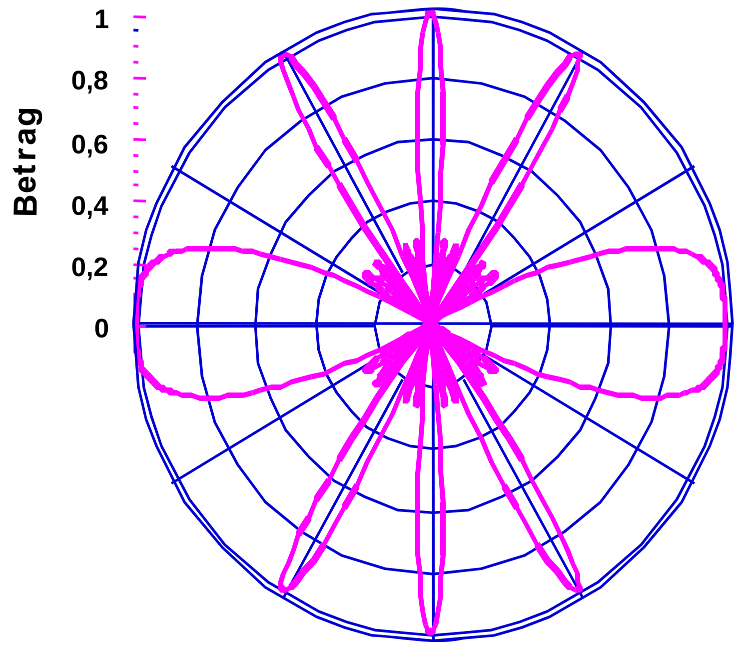


$dx/\lambda = 0{,}5$ $\qquad$ $dx/\lambda = 1$

Gruppenfaktor bei homogener Phasenbelegung und Variation des Elementabstandes (4 Elemente)

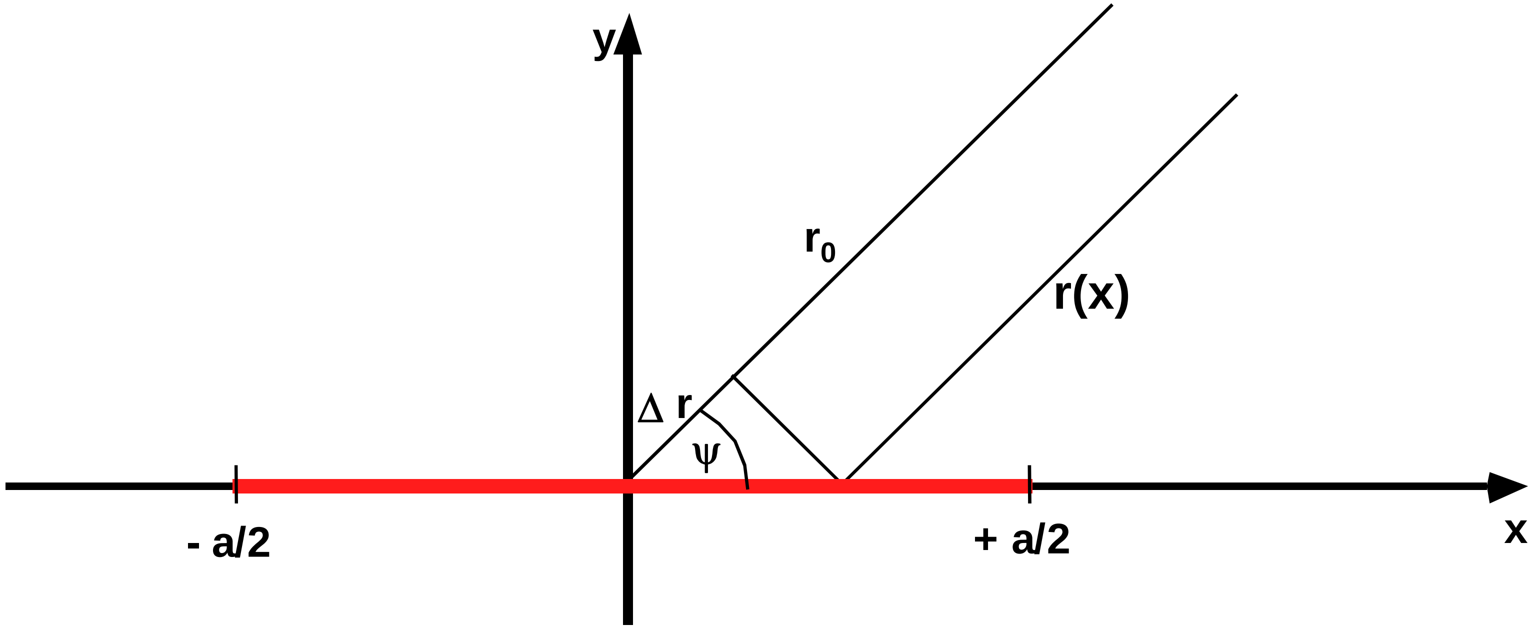


$dx/\lambda = 1,5$



$dx/\lambda = 2$

Gerade mit stetig verteilten Einzelstrahlern



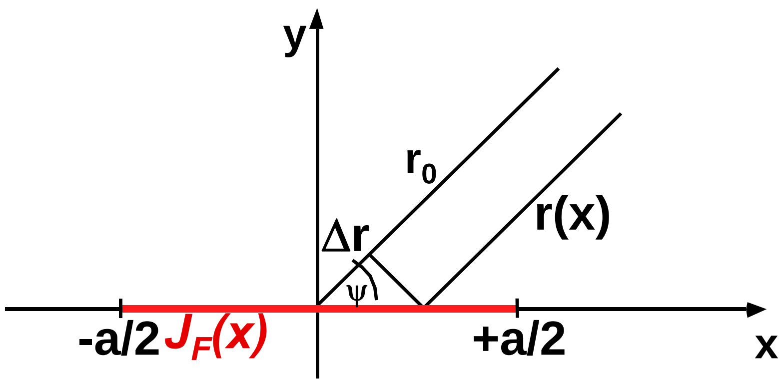
$$dI = J_F(x)\,dx \qquad F_{Gr} = \int_{-\infty}^{\infty} J_F(x)\, e^{-j\beta_0 (r(x)-r_0)}\,dx = \int_{-\infty}^{\infty} J_F(x)\, e^{-j\beta_0 \Delta r(x)}\,dx$$

$$\Delta r(x) = r(x) - r_0 = -x\cos\psi\sin\theta$$

$$F_{Gr} = \int_{-\infty}^{\infty} J_F(x)\, e^{j\beta_x x}\,dx \qquad \beta_x = \beta_0 \cos\psi\sin\theta$$

Gerade mit stetig verteilten Einzelstrahlern

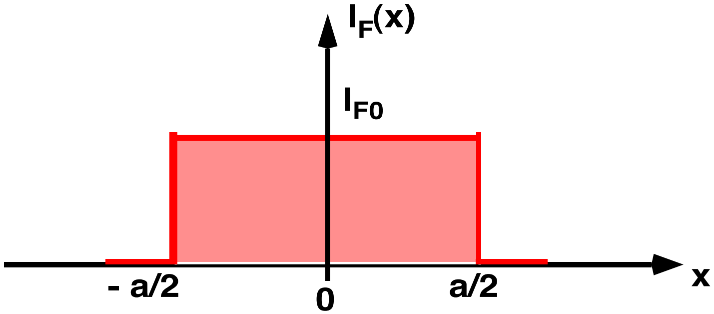
Strombelegung $J_F(x)$ ○——● **Gruppenfaktor $F_{Gr}(ß_x)$**



Homogene Strombelegung (1)

Karlsruhe Institute of Technology

Strombelegungsfunktion $J_F(x)$ homogen



$$J_F(x) = \begin{cases} J_{F0} & \text{für } -\frac{a}{2} \le x \le \frac{a}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

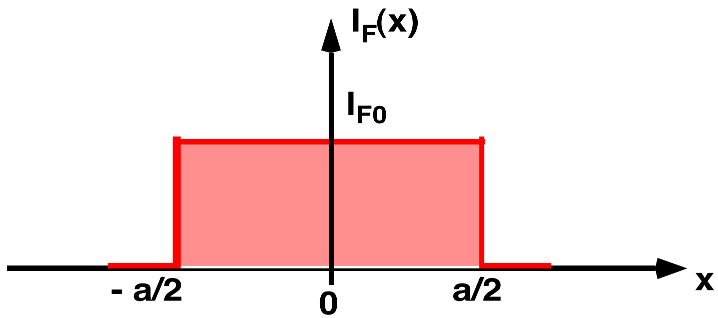
$$F_{Gr} = \int_{-a/2}^{a/2} J_F(x) e^{j\beta_x x}\, dx = \frac{J_{F0}}{j\beta_x} e^{j\beta_x x}\Big|_{-a/2}^{a/2} = \frac{J_{F0}}{j\beta_x}\left(e^{j\beta_x \frac{a}{2}} - e^{-j\beta_x \frac{a}{2}} \right) =$$

$$= \frac{J_{F0} 2j \sin\left(\beta_x \frac{a}{2}\right)}{j\beta_x} = J_{F0} a \frac{\sin\left(\beta_x \frac{a}{2}\right)}{\beta_x \frac{a}{2}}$$

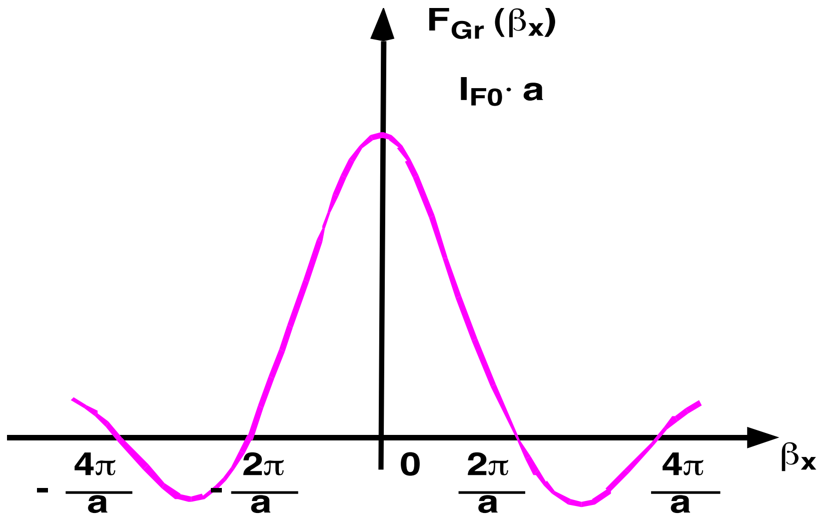
Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Homogene Strombelegung (2)

Strombelegungsfunktion $J_F(x)$ homogen

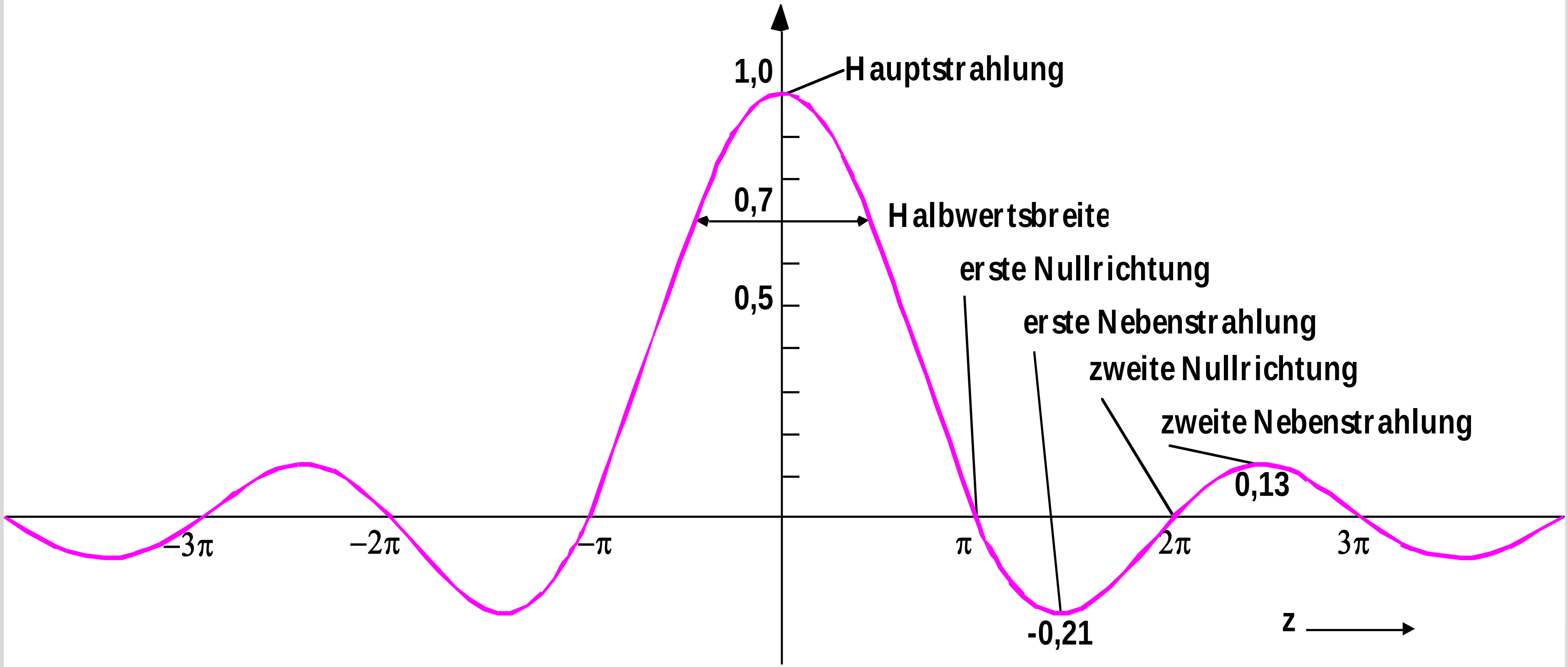


Gruppenfaktor $F_{Gr}(\beta x)$

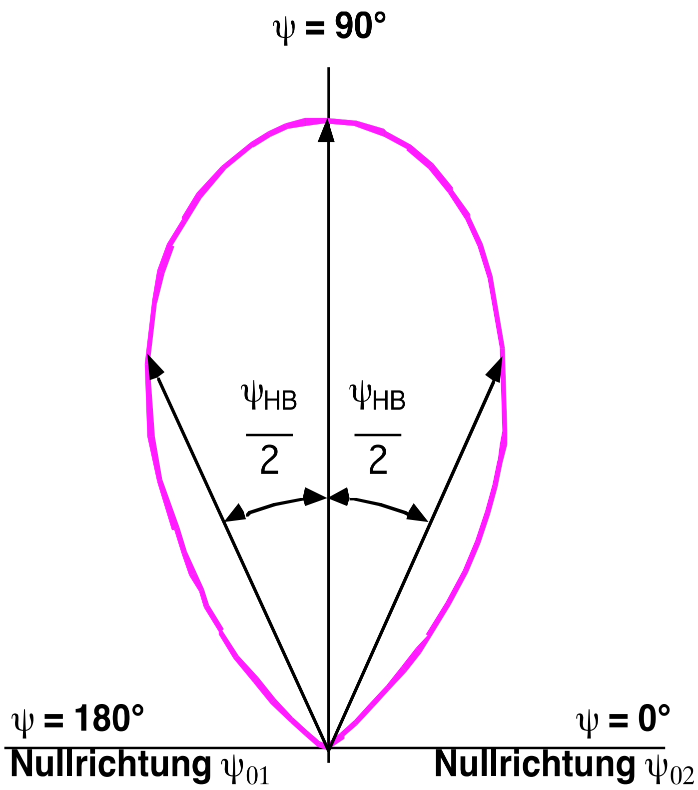


$$C_{Gr}(\theta,\psi) = \frac{\left|\sin(\beta_x \frac{a}{2})\right|}{\left|\beta_x \frac{a}{2}\right|} = \frac{\left|\sin(\frac{\pi a}{\lambda}\cos\psi\sin\theta)\right|}{\left|\frac{\pi a}{\lambda}\cos\psi\sin\theta\right|} = \frac{|\sin\xi|}{|\xi|}$$

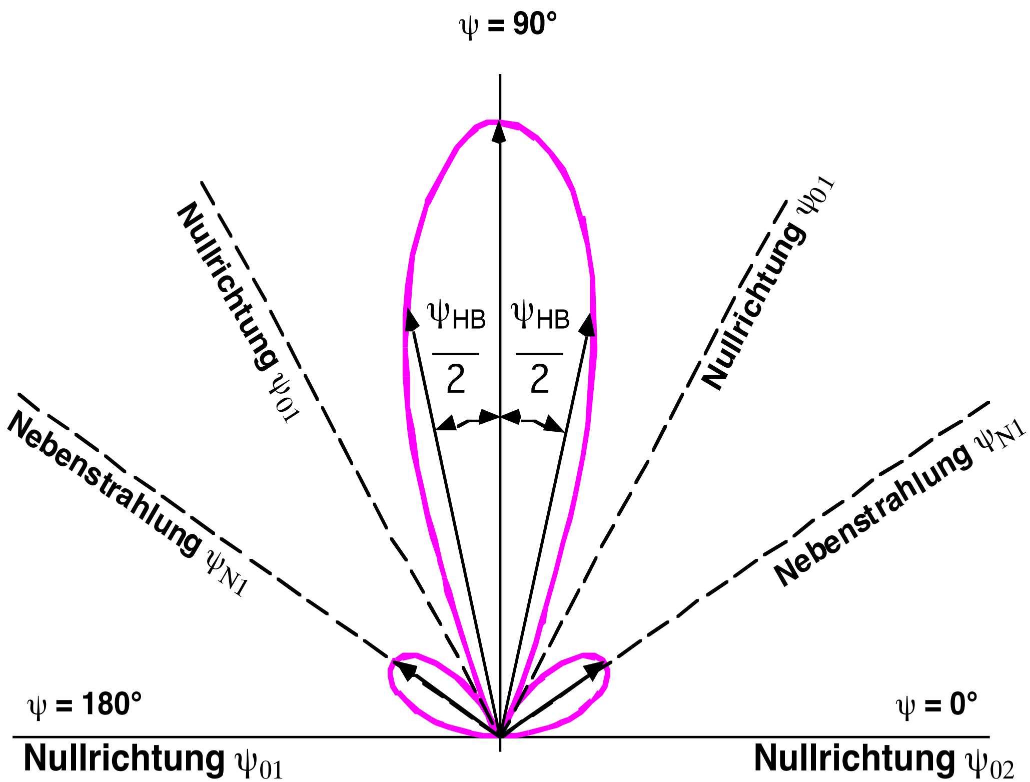
Stetig verteilte Dipole auf einer Geraden, Gruppenfaktor für konstante Belegung



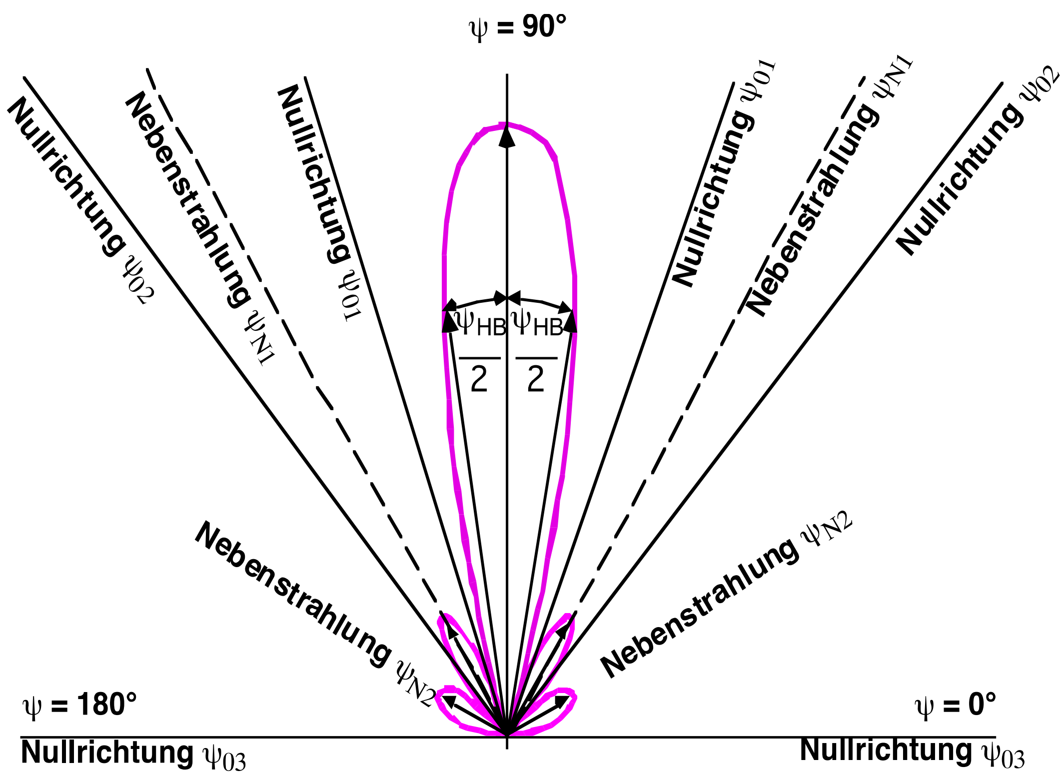
Zeile Hetz ‘scher Dipole mit konstanter Strombelegung Horizontaldiagramm Gruppenfaktor (Dipollänge *a*=λ)



Zeile Hetz ‘scher Dipole mit konstanter Strombelegung Horizontaldiagramm Gruppenfaktor (Dipollänge a=2λ)

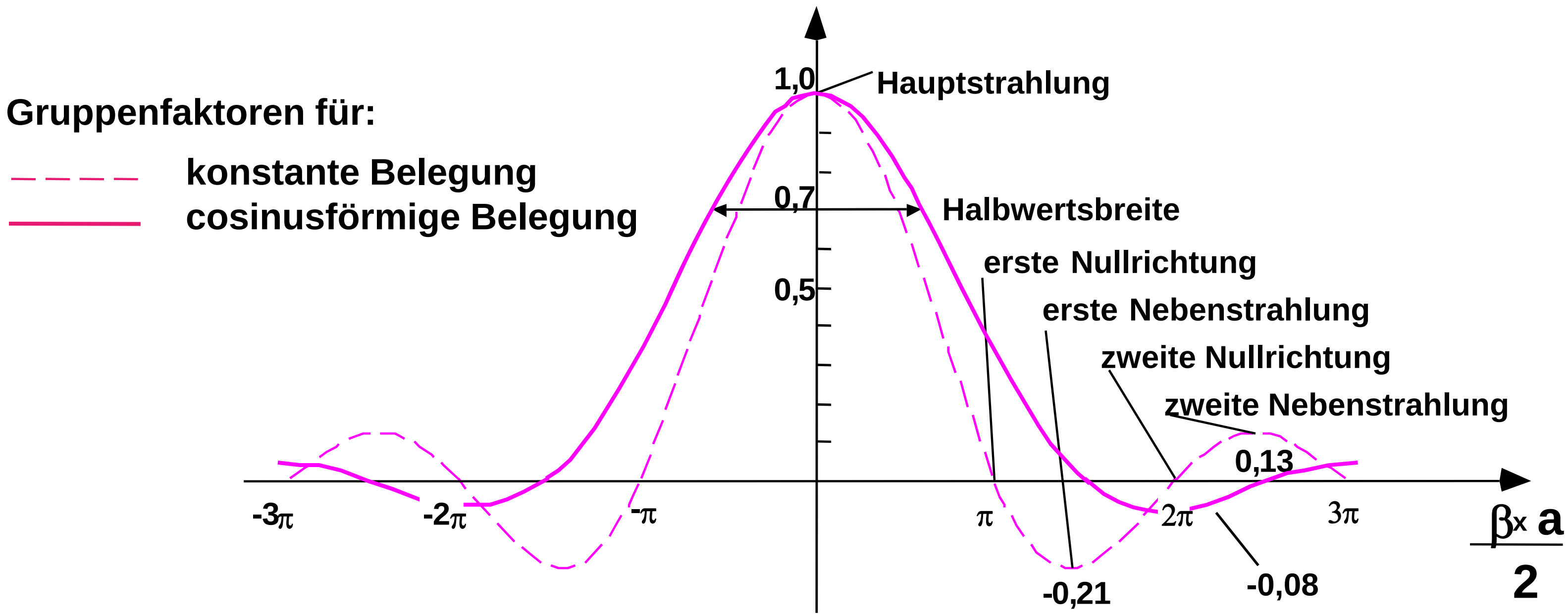


Zeile Hetz ‘scher Dipole mit konstanter Strombelegung Horizontaldiagramm Gruppenfaktor (Dipollänge a = 3λ)



Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Verminderung des Nebenkeulen durch verminderte Randstrahlung (Taperung)



$$J_F(x) = \begin{cases} J_{F0}\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) & \text{für } -\frac{a}{2} \le x \le \frac{a}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \qquad F_{Gr} = \int_{-a/2}^{a/2} J_{F0}\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{j\beta_x x}\,dx = J_{F0}\frac{\left(\frac{\pi a}{2}\right)\cos\left(\beta_x \frac{a}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \left(\beta_x \frac{a}{2}\right)^2}$$

Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Schrägstrahlung durch Phasenbelegung

$$J_F(x) = \begin{cases} J_{F0} e^{j2\pi\frac{x}{x_0}} & \text{für } -\frac{a}{2} \le x \le \frac{a}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \qquad F_{Gr} = J_{F0} a \cdot \frac{\sin\left(\left(\beta_x + \frac{2\pi}{x_0}\right)\frac{a}{2}\right)}{\left(\beta_x + \frac{2\pi}{x_0}\right)\frac{a}{2}} \quad \text{mit } \beta_x = \frac{2\pi}{\lambda_0}\cos\psi\sin\theta$$

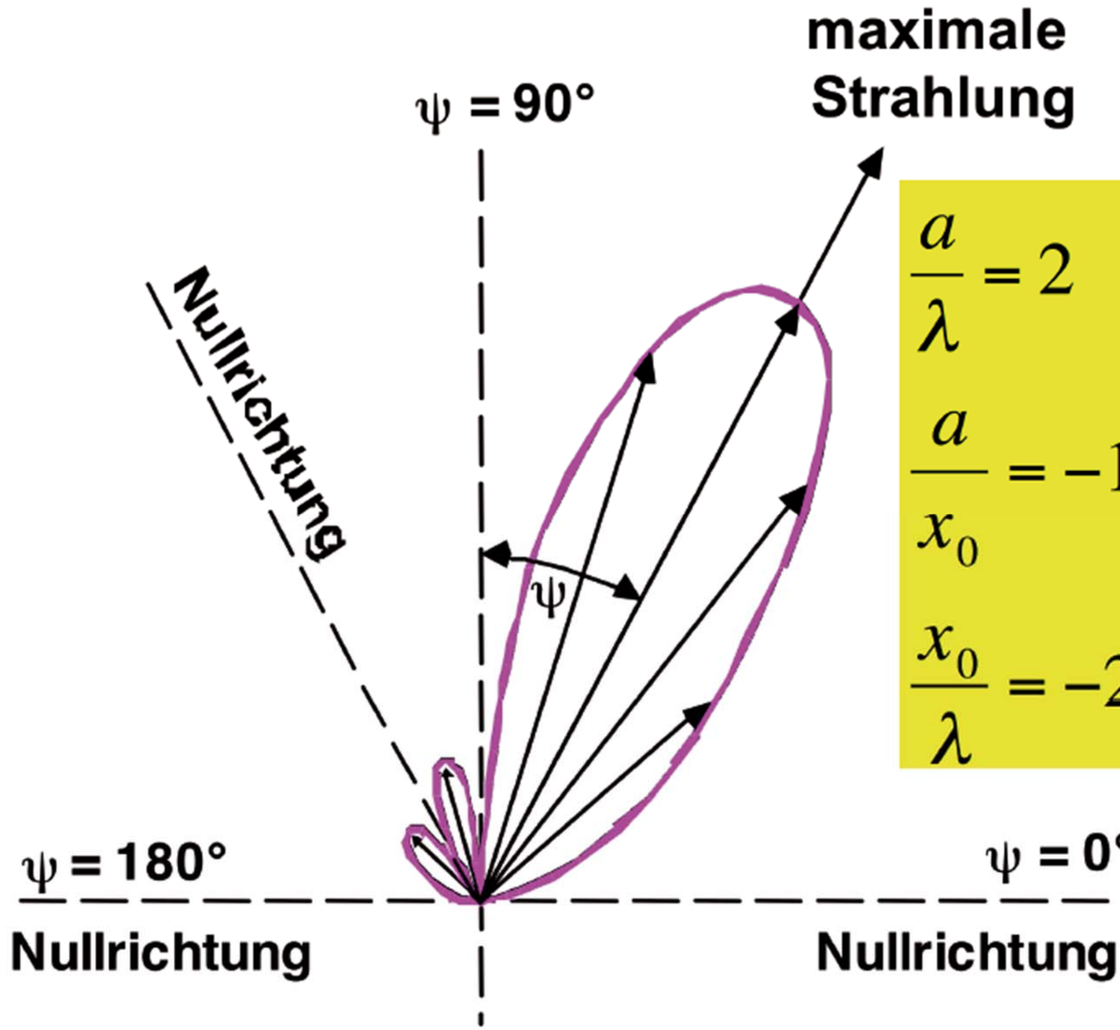
$$\text{Hauptstrahlrichtung } (\theta = 90°)\text{: } \frac{\pi a}{\lambda_0}\cos\psi_H + \frac{\pi a}{x_0} = 0 \quad \Rightarrow \psi_H = -\arccos\frac{\lambda_0}{x_0}$$

X_0 ist Strecke über der sich die Phasenbelegung um 2π ändert

Längsstrahler:

$$\left.\begin{array}{ll} \psi_H = 0° & \Rightarrow x_0 = -\lambda_0 \\ \psi_H = 180° & \Rightarrow x_0 = \lambda_0 \end{array}\right\} \Rightarrow F_{Gr} = J_{F0} a \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda_0}(\cos\psi\sin\theta \pm 1)\right)}{\frac{\pi a}{\lambda_0}(\cos\psi\sin\theta \pm 1)}$$

Stabstrahler mit Schrägstrahlung durch Phasenbelegung

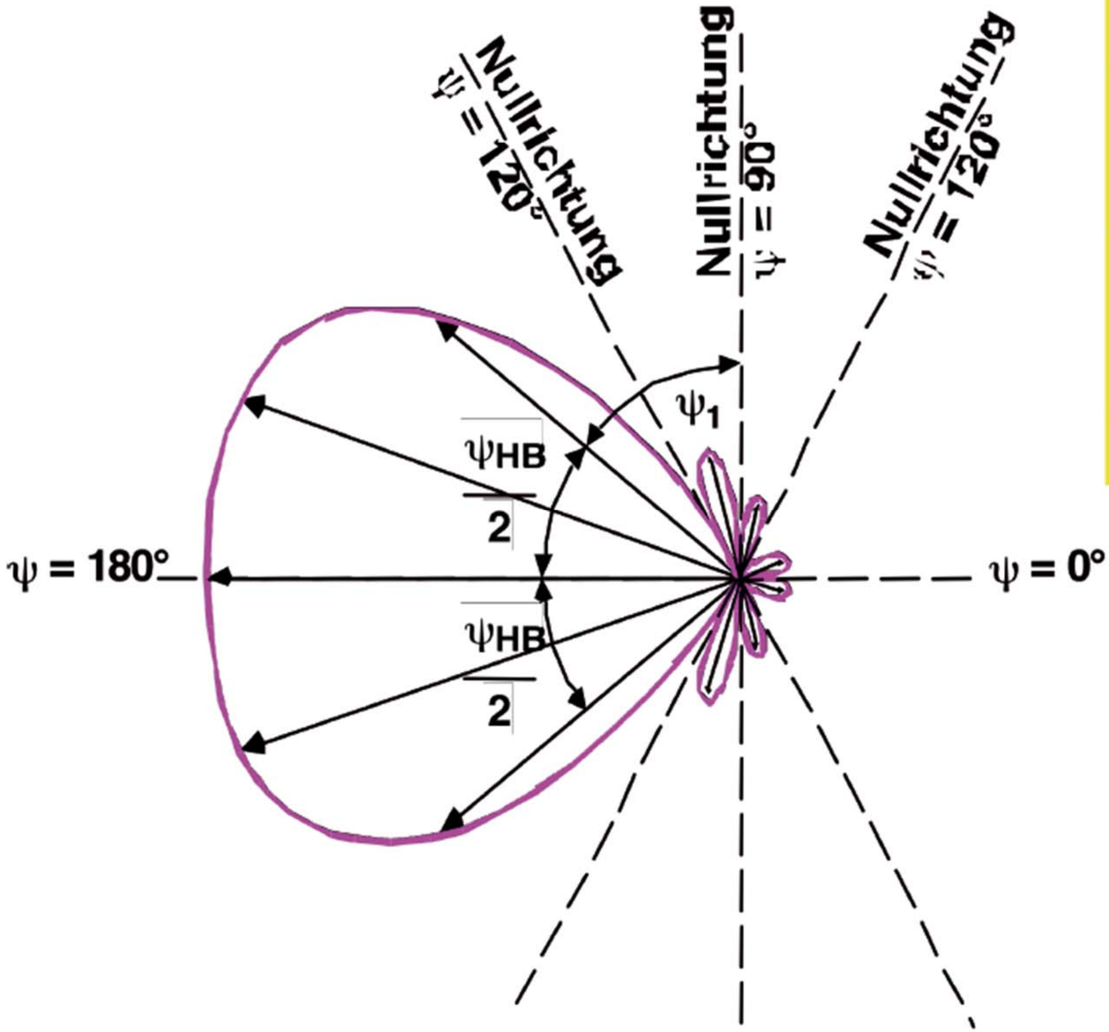


$$\frac{a}{\lambda} = 2$$

$$\frac{a}{x_0} = -1$$

$$\frac{x_0}{\lambda} = -2$$

Längsstrahler

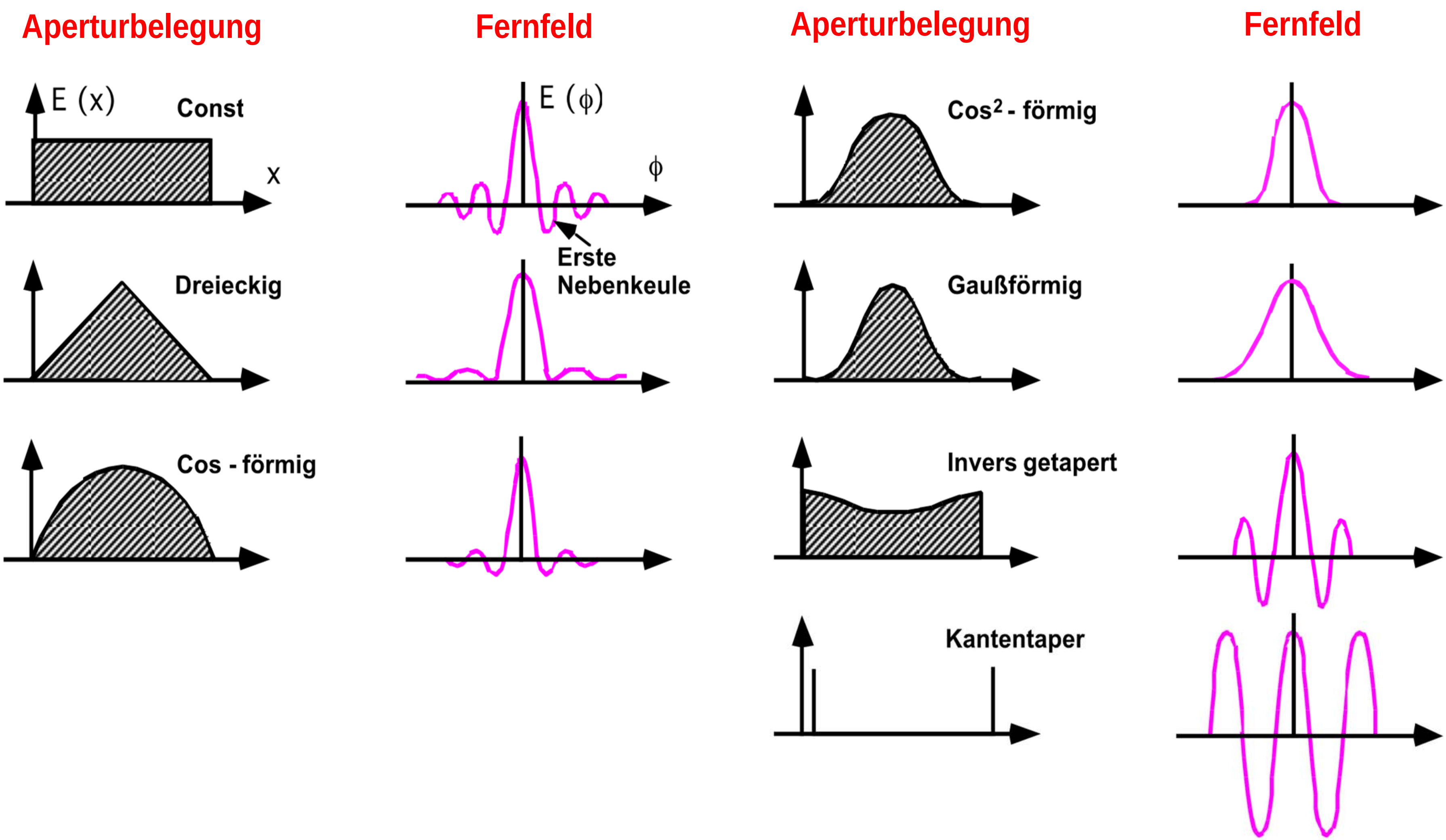


$$\frac{a}{\lambda} = 2$$

$$\frac{a}{x_0} = 2$$

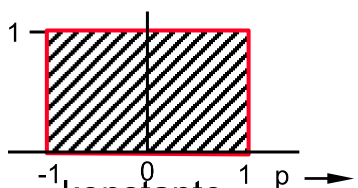
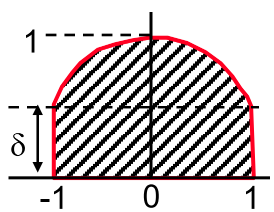
$$\frac{x_0}{\lambda} = 1$$

Zusammenhang Strombelegung-Fernfeld



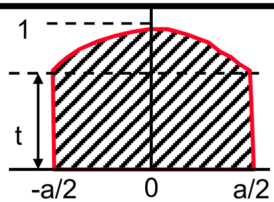
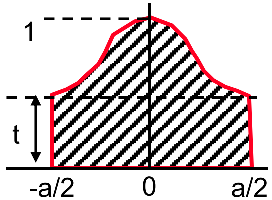
Institut für Hochfrequenztechnik
und Elektronik

Antennenbelegung $\Rightarrow$ Charakteristik I

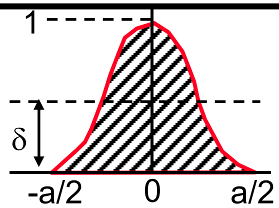
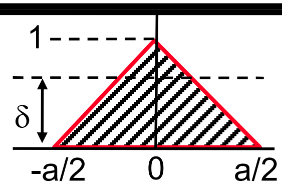
Belegungsfunktion	Strahlungsfunktion	δ	Halbwerts-breite	Nullwerts-breite	1. Neben-maxima	Flächen-nutzung
$J_F(p)=J_{F0}(p)\cdot f(p)$ mit $p=2\frac{x}{a}\cdot 2\frac{y}{a}\cdot 2\frac{z}{a}$	$F_{Gr}(u)=\frac{a}{2}\cdot J_{F0}\cdot g(u)$ *mit* $u=\beta_x\frac{a}{2}\cdot\beta_y\frac{a}{2}\cdot\beta_z\frac{a}{2}$	δ	$\theta_{HB}=2\theta_{HW}$	$2\theta_0$	a_{W1}	$\eta=A_W/F$
 konstante Belegung $f(p)=1$	$\frac{1}{2}g(u)=sp(u)=\frac{\sin u}{u}$		50,5° λ/l	115° λ/l	13,2	1
 kreisförmige Belegung $f(p)=1-(1-\delta)p^2$	$\frac{1}{2}g(u)=sp(u)+(1-\delta)\frac{d^2}{du^2}sp(u)=$ $=sp(u)+(1-\delta)\frac{(2-u^2)\sin u-2u\cos u}{u^3}$	1 0,8 0,5 0	50,5° λ/l 52,5° λ/l 55,5° λ/l 66° λ/l	115° λ/l 121,5° λ/l 130,5° λ/l 164° λ/l	13,2 15,8 17,1 20,6	1 0,994 0,97 0,833

Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Antennenbelegung $\Rightarrow$ Charakteristik II

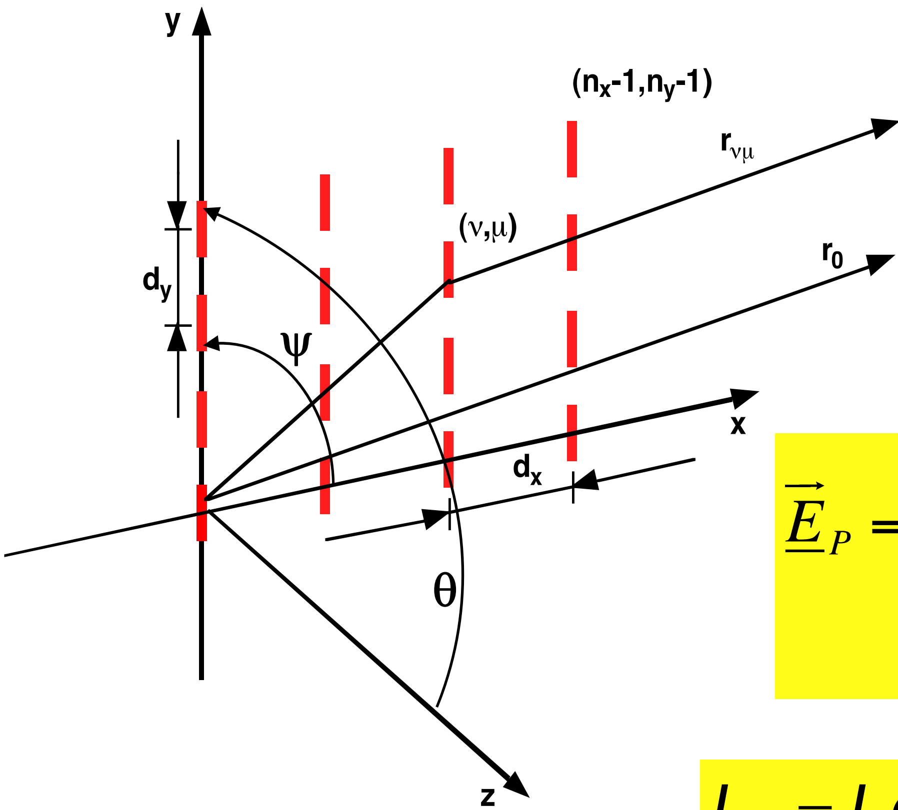
Belegungsfunktion	Strahlungsfunktion	t	Halbwerts-breite $\theta_{HB}=2\theta_{HW}$	Nullwerts-breite $2\theta_0$	1. Neben-maxima a_{W1}	Flächen-nutzung $\eta=A_W/F$
$J_F(p)=J_{F0}(p)\cdot f(p)$ mit $p=2\frac{x}{a}\cdot 2\frac{y}{a}\cdot 2\frac{z}{a}$	$F_{Gr}(u)=\frac{a}{2}\cdot J_{F0}\cdot g(u)$ mit $u=\beta_x\frac{a}{2}\cdot\beta_y\frac{a}{2}\cdot\beta_z\frac{a}{2}$					
 cos-förmige Belegung mit Sockel $f(p)=t+(1-t)\cos\left(\frac{\pi}{2}p\right)$	$g(u)=\left(2t+\frac{4}{\pi}(1-t)\right)sp(u)+\frac{1-t}{\pi}\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{(-1)^{\nu+1}}{\nu^2-\frac{1}{4}}(sp(u+\nu\pi)+sp(u-\nu\pi))=2t\,sp(u)+\frac{4}{\pi}(1-t)\frac{\cos u}{1-\frac{4u^2}{\pi^2}}$	1	50,5° λ/l	115° λ/l	13,2	1
		0,8	52° λ/l	120° λ/l	14	0,99
		0,6	54° λ/l	127° λ/l	16	0,975
		0,4	57,5° λ/l	137° λ/l	18,6	0,95
		0,2	62° λ/l	150° λ/l	21,5	0,915
		0	68,5° λ/l	172° λ/l	23	0,81
 $\cos^2$-förmige Belegung mit Sockel $f(p)=t+(1-t)\cos^2\left(\frac{\pi}{2}p\right)=\frac{1+t}{2}+\frac{1-t}{2}\cos(\pi p)$	$g(u)=(1+t)sp(u)+\frac{1-t}{2}\cdot\{sp(u+\pi)+sp(u-\pi)\}=(1+t)sp(u)-(1-t)\frac{u\sin u}{u^2-\pi^2}$	1	50,5° λ/l	115° λ/l	13,2	1
		0,8	52,5° λ/l	121,5° λ/l	15,2	0,99
		0,6	56° λ/l	132° λ/l	18,7	0,97
		0,4	60,5° λ/l	144° λ/l	24,3	0,94
		0,2	67,5° λ/l	187° λ/l	30,3	0,885
		0	83° λ/l	229° λ/l	32	0,667

Antennenbelegung $\Rightarrow$ Charakteristik III

Belegungsfunktion $J_F(p) = J_{F0}(p) \cdot f(p)$ mit $p = 2\frac{x}{a} \cdot 2\frac{y}{a} \cdot 2\frac{z}{a}$	Strahlungsfunktion $F_{Gr}(u) = \frac{a}{2} \cdot J_{F0} \cdot g(u)$ *mit* $u = \beta_x \frac{a}{2} \cdot \beta_y \frac{a}{2} \cdot \beta_z \frac{a}{2}$		Halbwerts-breite $\theta_{HB}=2\theta_{HW}$	Nullwerts-breite $2\theta_0$	1. Neben-maxima a_{W1}	Flächen-nutzung $\eta=A_W/F$
 cos^n-förmige Belegung $f(p) = \cos^n\left(\frac{\pi}{2}p\right)$	$g(u) = 2\frac{n!}{\prod_{\nu=1}^{n}\left\{(2\nu)^2 - \frac{4u^2}{\pi^2}\right\}} sp(u)$ *für* $n = 2m$ $g(u) = \frac{4}{\pi}\frac{n!\cos u}{\prod_{\nu=1}^{n}\left\{(2\nu+1)^2 - \frac{4u^2}{\pi^2}\right\}} sp(u)$ *für* $n = 2m+1$ $(m = 0,1\ldots)$	n=0 1 2 3 4	50,5° λ/l 68,5° λ/l 83° λ/l 95° λ/l 110,5° λ/l	115° λ/l 172° λ/l 229° λ/l 287° λ/l 344° λ/l	13,2 23 32 40 48	1 0,81 0,66 7 0,57 5 0,51 5
 Dreieckförmige Belegung $f(p) = 1 - \lvert p \rvert$	$g(u) = sp^2\left(\frac{u}{2}\right)$		73° λ/l	229° λ/l	26,4	0,75

Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

Ebene Antennengruppe



nach P

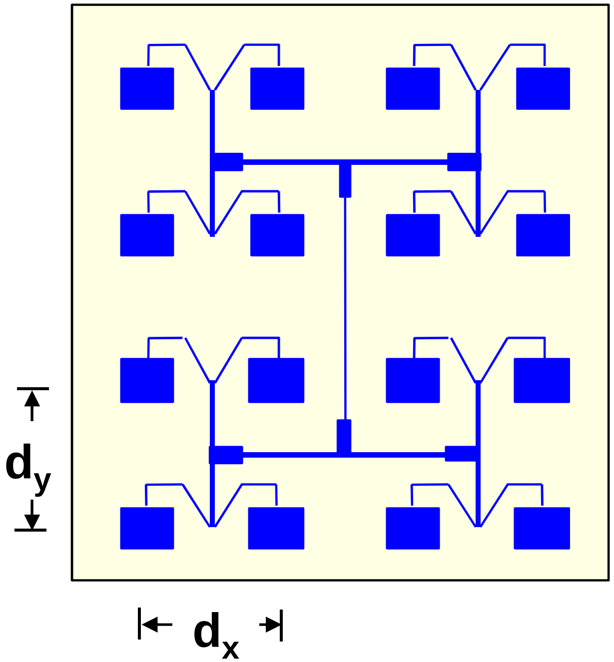
$$\underline{\vec{E}}_P = \underbrace{\underline{\vec{E}}''(\theta_0,\psi_0)\underline{I}_0}_{F_E} \cdot \underbrace{\frac{e^{-j\beta_0 r_0}}{r_0}}_{F_A} \cdot \underbrace{\sum_{\nu=1}^{N}\sum_{\mu=1}^{M}\frac{\underline{I}_{\nu,\mu}}{\underline{I}_0} e^{-j\beta_0 \Delta r_{\nu,\mu}}}_{F_G}$$

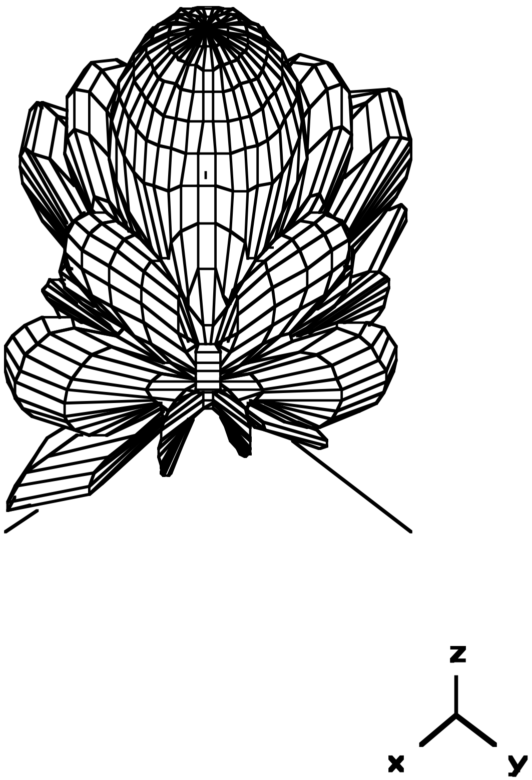
$$\underline{I}_{\nu\mu} = I_0 e^{-j(\nu\varphi_{ox}+\mu\varphi_{oy})}$$

$$\Delta r = r_{\nu\mu} - r_0 = -\nu d_x \cos\psi \sin\theta - \mu d_y \sin\psi \sin\theta$$

$$F_{Gr}(\theta,\psi) = \underbrace{F_{Grx}(\theta,\psi)}_{\text{Zeilengruppenfaktor}} \cdot \underbrace{F_{Gry}(\theta,\psi)}_{\text{Spaltengruppenfaktor}}$$

4 x 4 Patch Array mit $d_x/\lambda = d_y/\lambda = 0{,}85$

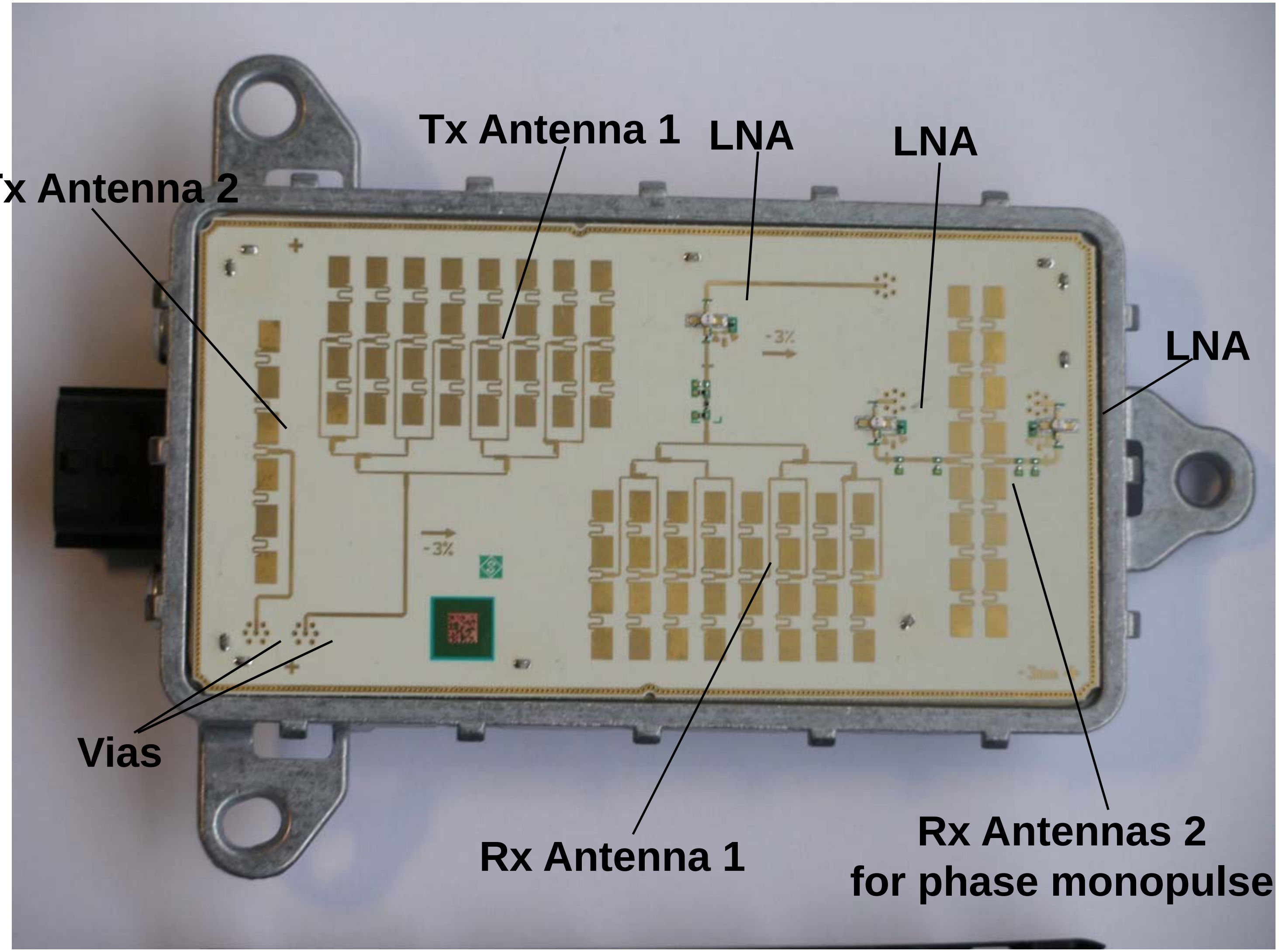




Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik

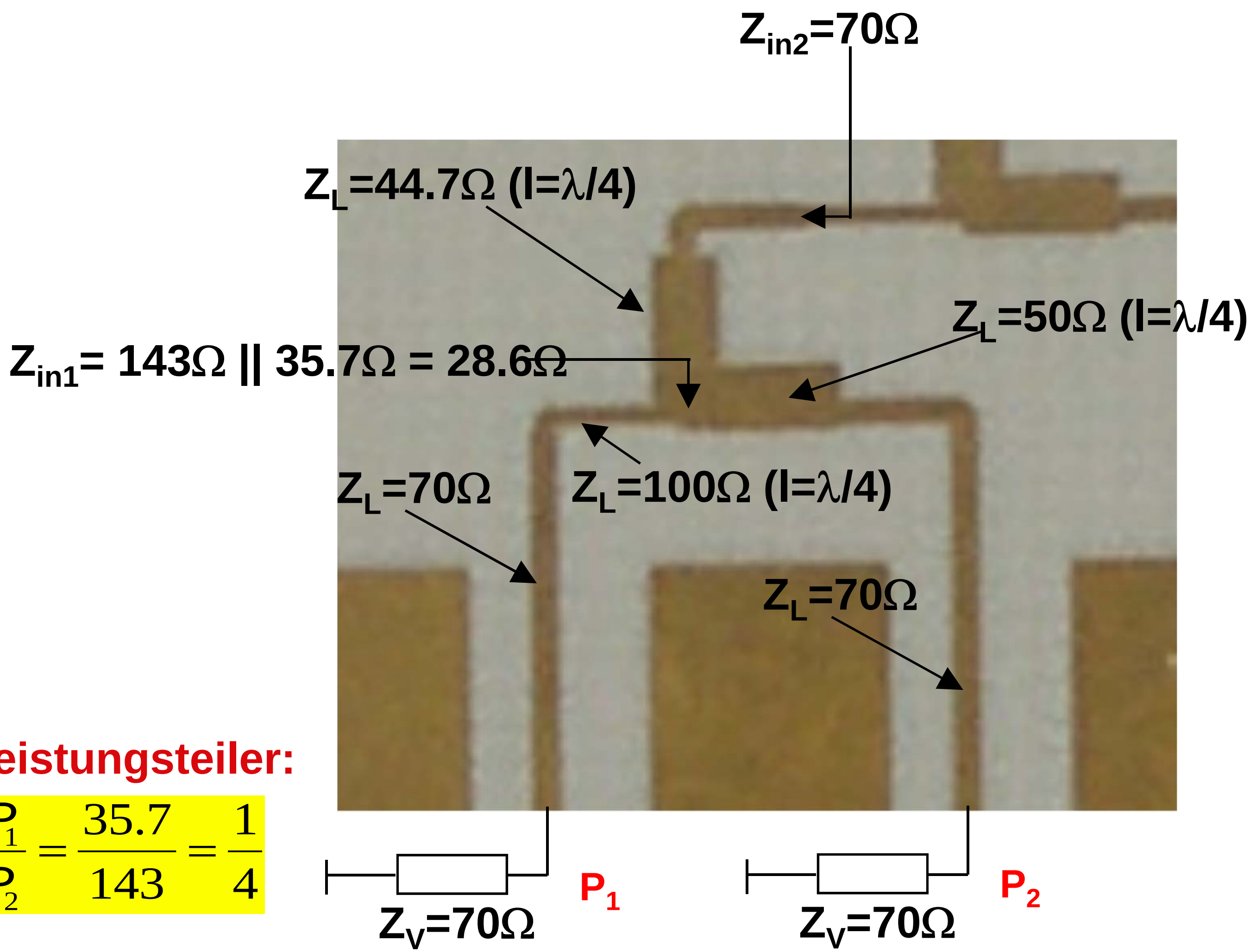
Blind Spot Detection Radar 24,5 GHz (Siemens VDO)

B=500 MHz



Courtesy
Siemens VDO

$\lambda/4$-Transformationen in Antennen-Verteilnetzwerk

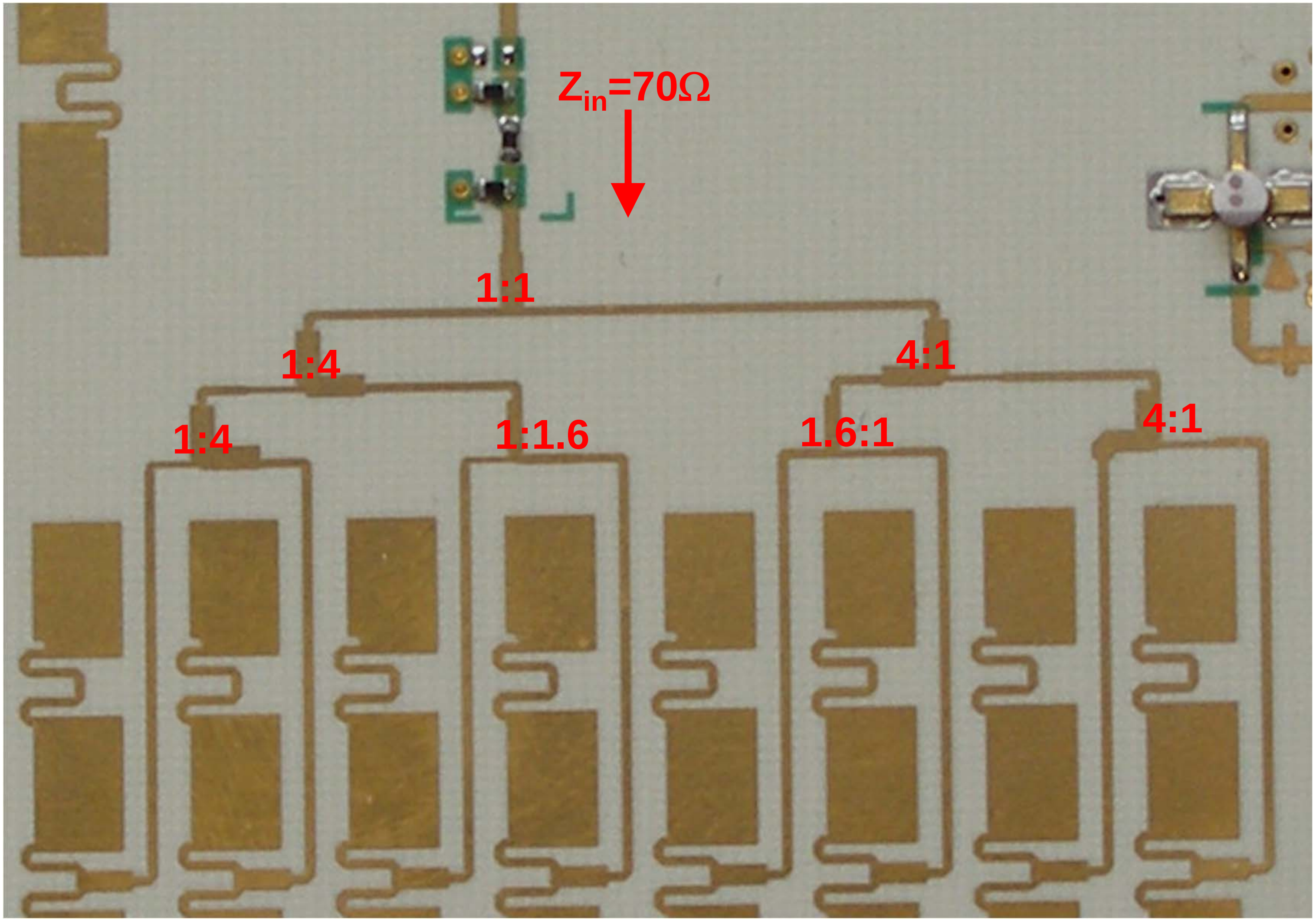


Leistungsteiler:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{35.7}{143} = \frac{1}{4}$$

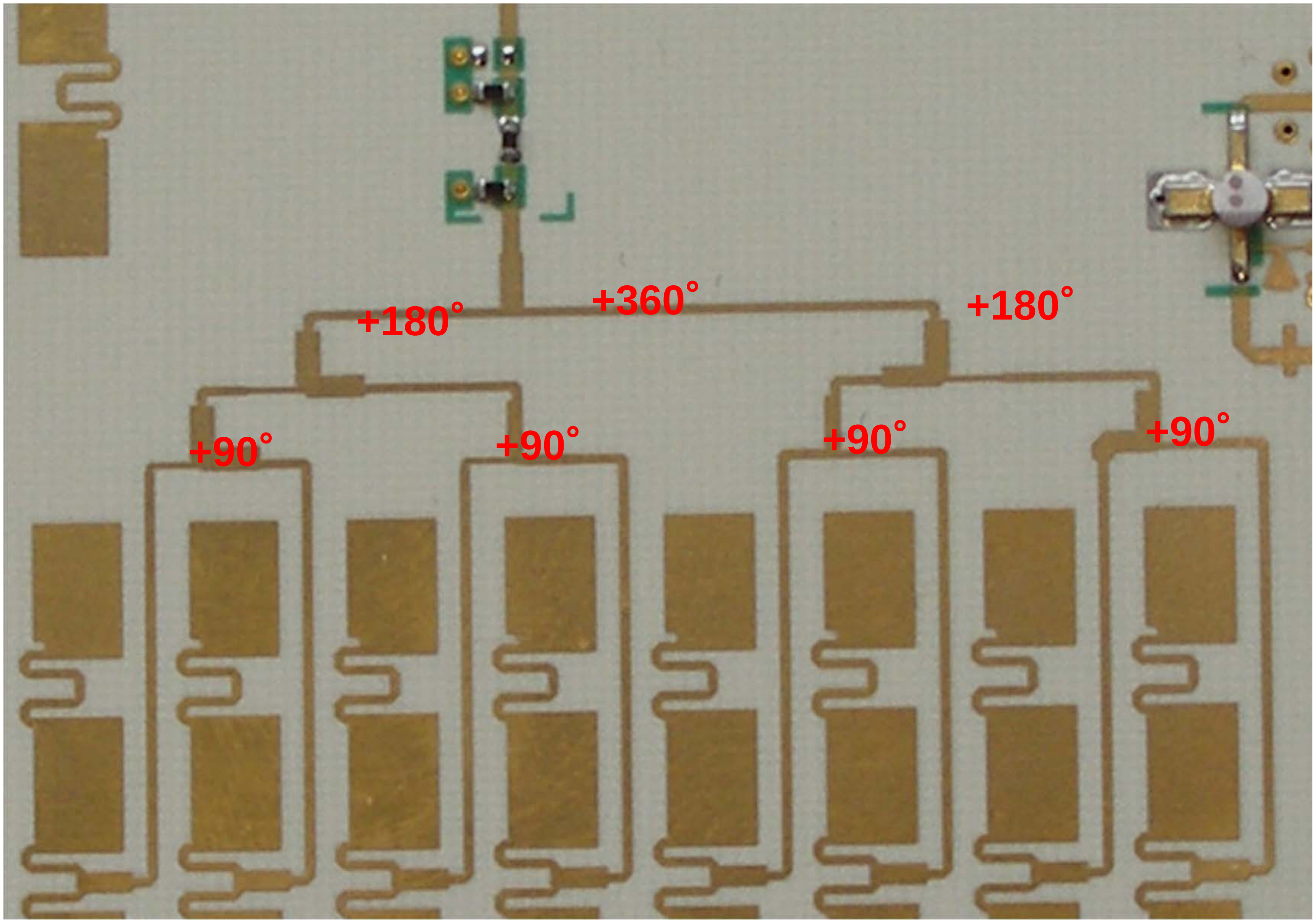
Courtesy Siemens VDO

Leistungsverteilung in Antennen-Verteilnetzwerk



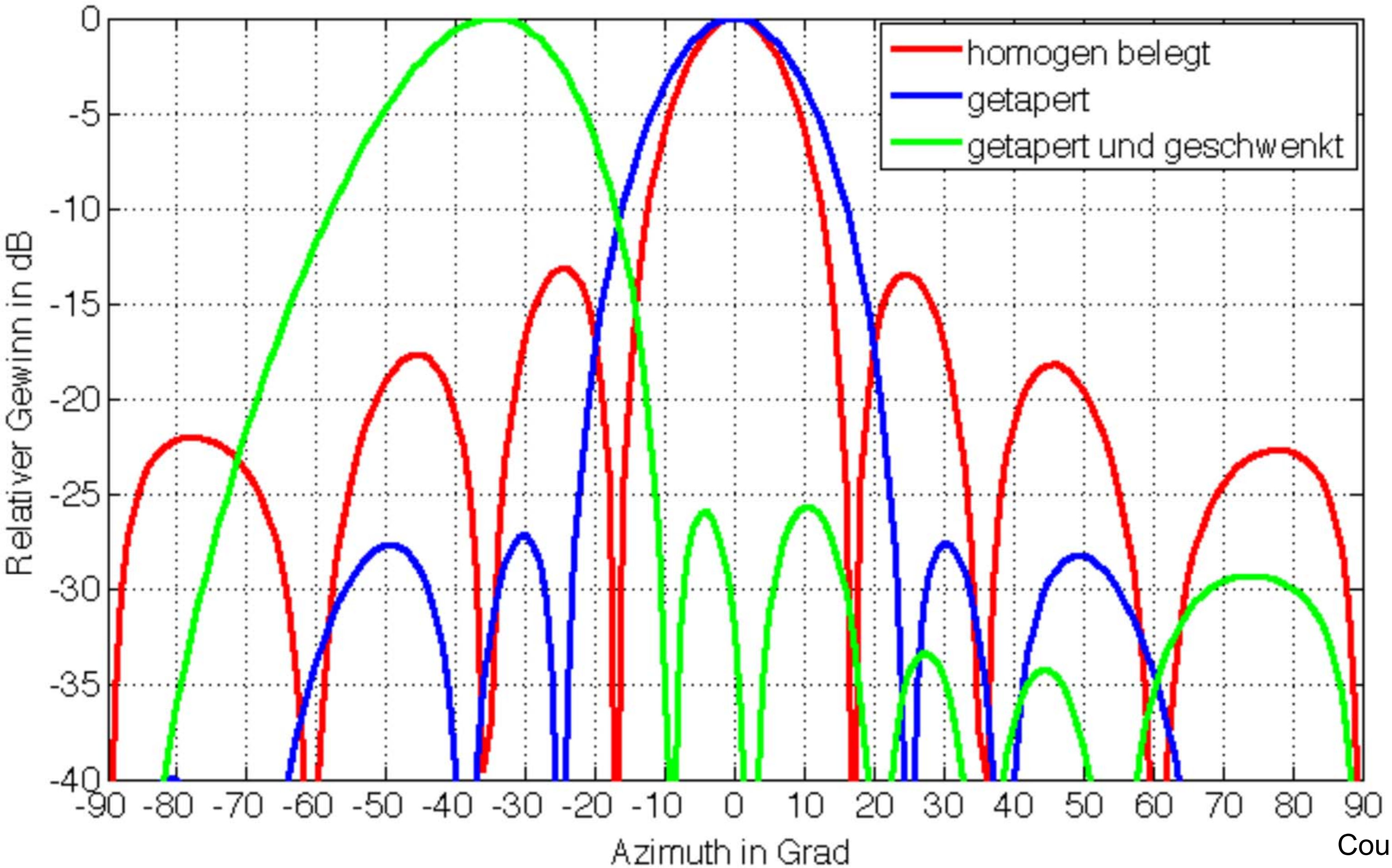
Courtesy
Siemens VDO

Phasenbelegung im Antennen-Verteilnetzwerk



Courtesy
Siemens VDO

Horizontaldiagramm BSD-Antenne



Courtesy
Siemens VDO

Zusammenfassung Antennenbelegung

x ○——● $\beta_x = \beta_0 \cos\psi \sin\theta$

y ○——● $\beta_y = \beta_0 \sin\psi \sin\theta$

z ○——● $\beta_z = \beta_0 \cos\theta$

Randstrahlung	**hoch**	**niedrig**
Nebenmaxima	**groß**	**niedrig**
Hauptkeule	**schmal**	**breit**
Gewinn	**hoch**	**verringert**
Flächenwirkungsgrad	**hoch**	**niedrig**

Lineare Phasenbelegung schwenkt Hauptkeule in Richtung der nacheilenden Phasen

Radaranlagen mit elektronischer Strahlschwenkung

E-3A Sentry / AWACS und die Antenne des AN/APY-2 Radars (1977)

Mobiles Luftraumüberwachungs-Radar Telefunken TRMS-3D und Ausschnitt aus dem Array (1971-1979)

Phased Array Radar System