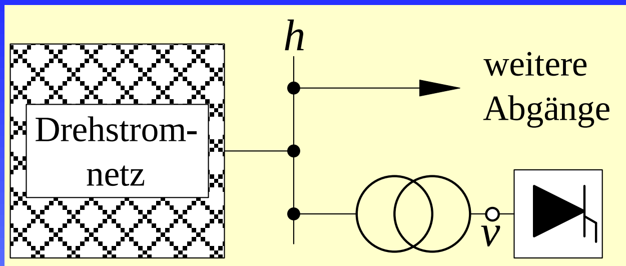
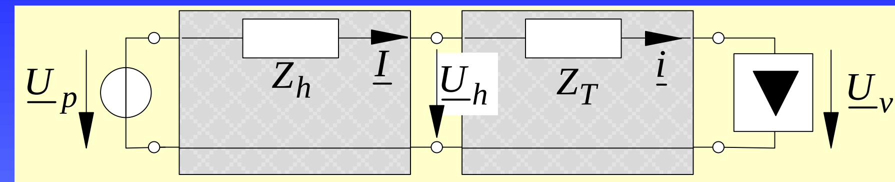
Stationärer Betrieb von Stromrichtern am Drehstromnetz

IEEE - Power and Energy Student Summit (PESS) 2017
Technical Lecture

gerhard.herold@fau.de

Raumzeiger-Ersatzschaltung & Bezugsgrößen





$$Z = Z_h + Z_T = R + X \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}wt}$$

Die Leerlaufspannungen des Drehstromsystems seien kosinusförmig und symmetrisch. Der Leerlaufspannungs-Raumzeiger besteht dann nur aus der Mitkomponente.

$$\underline{U}_p = \underline{\hat{U}}_{p(1)}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}wt} = \hat{U}_{p(1)}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}g}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}wt} \xrightarrow{\text{Bezugsspannung}} U_{bez} = \hat{U}_{p(1)} \quad\Rightarrow\quad \underline{u}_p = \mathrm{e}^{\mathrm{j}g}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}wt}$$

Bezugsstrom: dreipoliger Kurzschlußwechselstrom an den drehstromseitigen Stromrichterklemmen.

$$I_{bez} = \hat{I}_k'' = \frac{\hat{U}_{p(1)}}{|\underline{Z}|} = \frac{\hat{U}_{p(1)}}{|R + \mathrm{j}X|} = \frac{U_{bez}}{Z_{bez}}$$

Bezugsimpedanz: Kurzschlußimpedanz an den drehstroms. Stromrichterklemmen bei Betriebsfrequenz

$$Z_{bez} = |R + \mathrm{j}X|$$

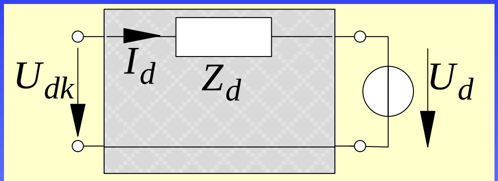
Bezugsleistung

$$S_{bez} = 3U_{p(1)}\,I_k'' = \frac{3}{2}U_{bez}I_{bez} = S_k''$$

bez. Raumzeiger-Spannungsgleichung

$$\underline{u}_p = z\,\underline{i} + \underline{u}_v \quad \text{mit} \quad z = r + x\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}wt}$$

Gleichstrom-Ersatzschaltung



$$Z_d = R_d + X_d \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}wt} \xrightarrow{\text{bezogen}} z_d = \frac{Z_d}{Z_{bez}} = r_d + x_d \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}wt}$$

bezogene Gleichspannungs-Gleichung ⇒

$$u_{dk} = z_d \, i_d + u_d$$

Gleichstromleistung der Drehstrombrücke ⇒

$$P_d = \frac{p}{2p} \int_0^{\frac{2p}{p}} U_d \, I_d \, \mathrm{d}wt = \frac{3}{p} \int_0^{\frac{p}{3}} U_d \, I_d \, \mathrm{d}wt \approx U_{\mathrm{da}} \, I_{\mathrm{da}} \quad \text{mit} \quad p = 6 \quad \text{Pulszahl}$$

bez. Gleichstromleistung ⇒

$$p_d = \frac{P_d}{S_{bez}} = \frac{2}{3} \frac{U_{da}}{U_{bez}} \frac{I_{da}}{I_{bez}} = \frac{2}{3} u_{da} \, i_{da} \quad \text{mit} \quad \left\{ \begin{matrix} U_{da} \\ I_{da} \end{matrix} \right. \quad \text{arithm. Mittelw. von Gleichspg. \& -strom}$$

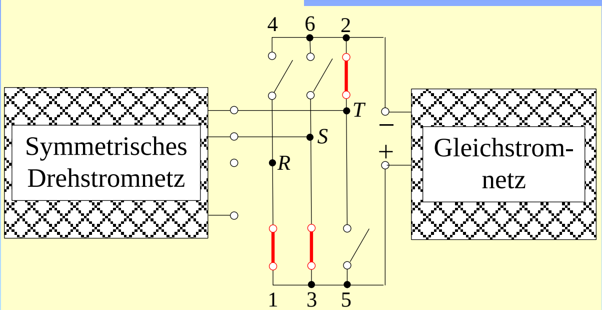
Normale Betriebszustände der Drehstrombrücke

Im stationären Betrieb sind die Gleichspannungen & -ströme periodisch mit 6-facher Betriebsfrequenz

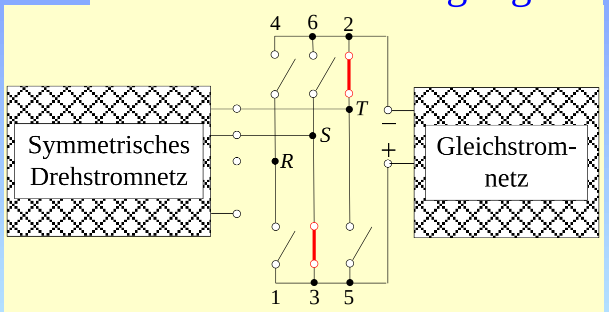
$$v_d\left(\frac{p}{3}\right)-v_d(0)=0$$

Während Gleichstromperiode findet im Normalbetrieb netzgeführter Stromrichter ein Wechsel zwischen drei und zwei stromfüh-renden Ventilen statt. **Kommutierung → Einfachventilbeteiligung**

Kommutierung



Einfachventilbeteiligung



Die Beteiligung der Ventile verläuft nach der angegebenen Numerierung

$\boxed{123 \rightarrow 23} \Rightarrow \boxed{234 \rightarrow 34} \Rightarrow \boxed{345 \rightarrow 45} \Rightarrow \boxed{456 \rightarrow 56} \Rightarrow \boxed{561 \rightarrow 61} \Rightarrow \boxed{612 \rightarrow 12} \Rightarrow$

Alle Gleichstromperioden verlaufen gleich, so daß nur eine berechnet muß. $\boxed{123 \rightarrow 23}$

Periodizität des stationären sechspulsigen Stromrichterbetriebes

Aus der Periodizität der sechspulsigen Gleichgrößen folgt die der sechspulsigen Raumzeiger im ruhenden Koordinatensystem

$$v_d\left(\frac{p}{3}\right) - v_d(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{v}\left(\frac{p}{3}\right) + \underline{a}^2\,\underline{v}(0) = 0$$

Im synchron umlaufenden Koordinatensystem sind Gleichgrößen- & Raumzeigerperiodizität gleich.

$$\underline{v}_r = \underline{v}\,\mathrm{e}^{-\,jwt} \quad \Rightarrow \quad \underline{v}_r\left(\frac{p}{3}\right) - \underline{v}_r(0) = 0$$

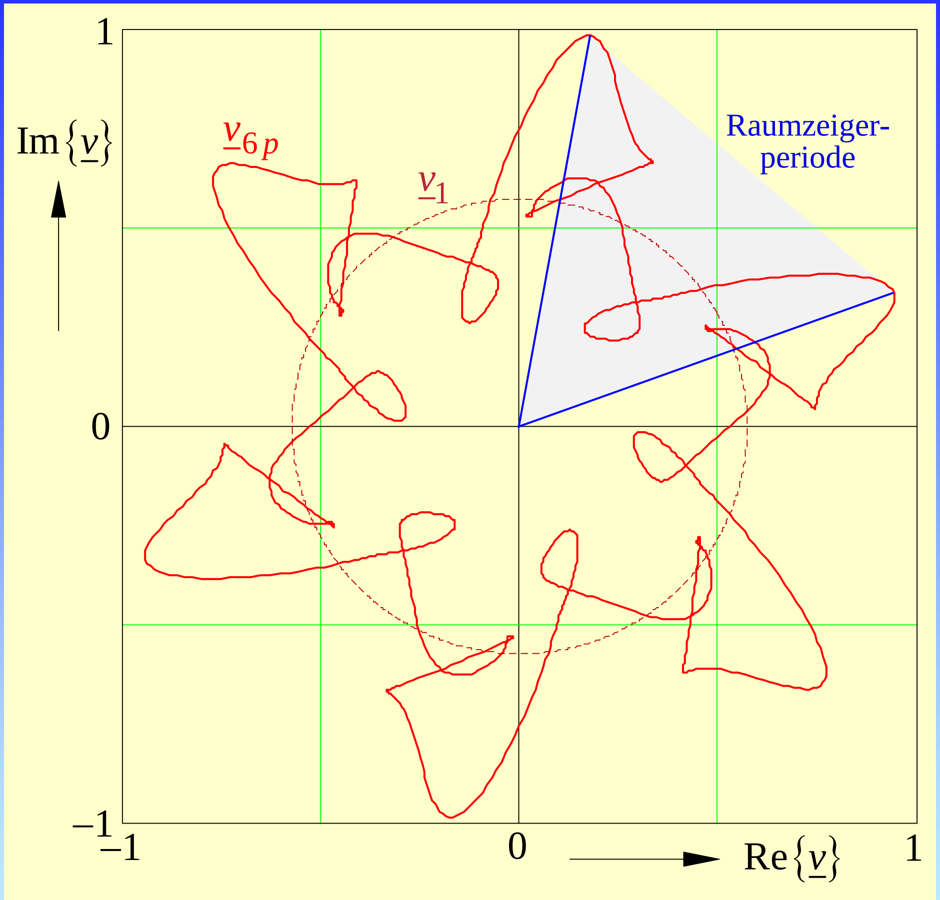
Die Raumzeiger aller Drehstrom-Zustandsgrößen sind sechspulsig periodisch.

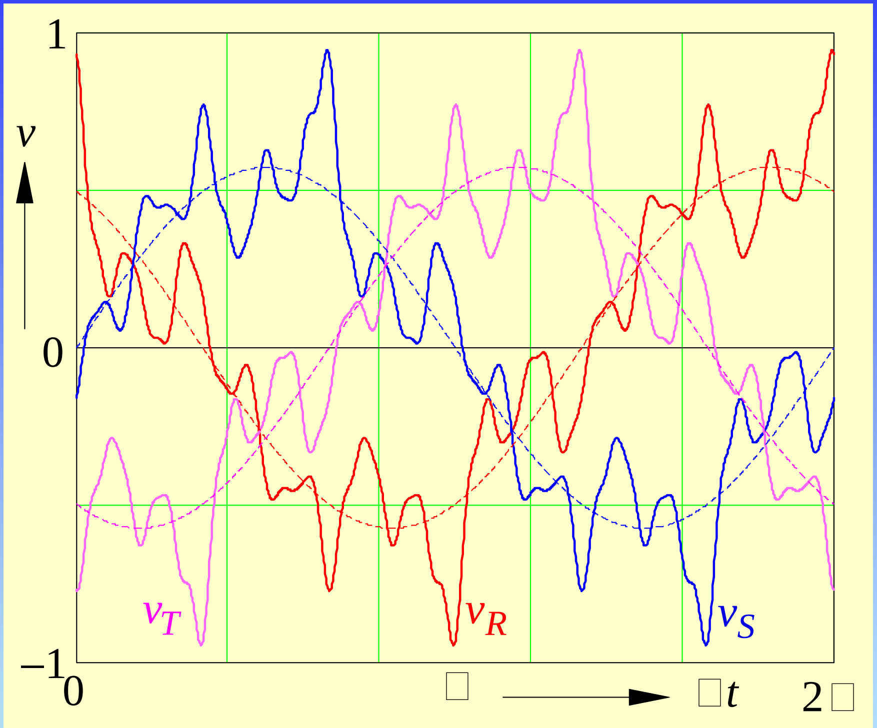
Der Übergang der Zustandsgrößen von der Kommutierung zur Einfachventilbeteiligung verläuft stetig.

$$v_d(b - 0) - v_d(b + 0) = 0 \qquad \underline{v}(b - 0) - \underline{v}(b + 0) = 0$$

Mit den Periodizitäts- & Übergangsbedingungen aller Zustandsgrößen des Stromrichtersystems ist der stationäre Betrieb definiert.

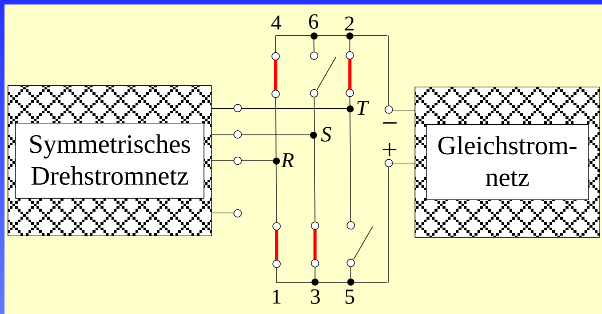
Sechspulsiger Raumzeiger & seine Periodizität





An einem sechspulsigen Raumzeiger ist die Periode deutlich zu erkennen, sie in seinen Stranggrößen wiederzufinden, braucht es zumindest Übung und Erfahrung.

Kurzschlußzustand der Drehstrombrücke



Bei Kommutierung in beiden Brückenhälften ist die Drehstrombrücke bei vernachlässigbaren Ventilzweigimpedanzen sowohl drehstrom- als auch gleichstromseitig kurzgeschlossen, so daß kein Leistungsaustausch zwischen beiden Systemen stattfinden kann.

$$\left.\begin{array}{l} u_R - u_S = 0 \\ u_R - u_T = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \quad \underline{u}_v = \frac{2}{3} u_R \left(1 + \underline{a} + \underline{a}^2\right) = 0$$

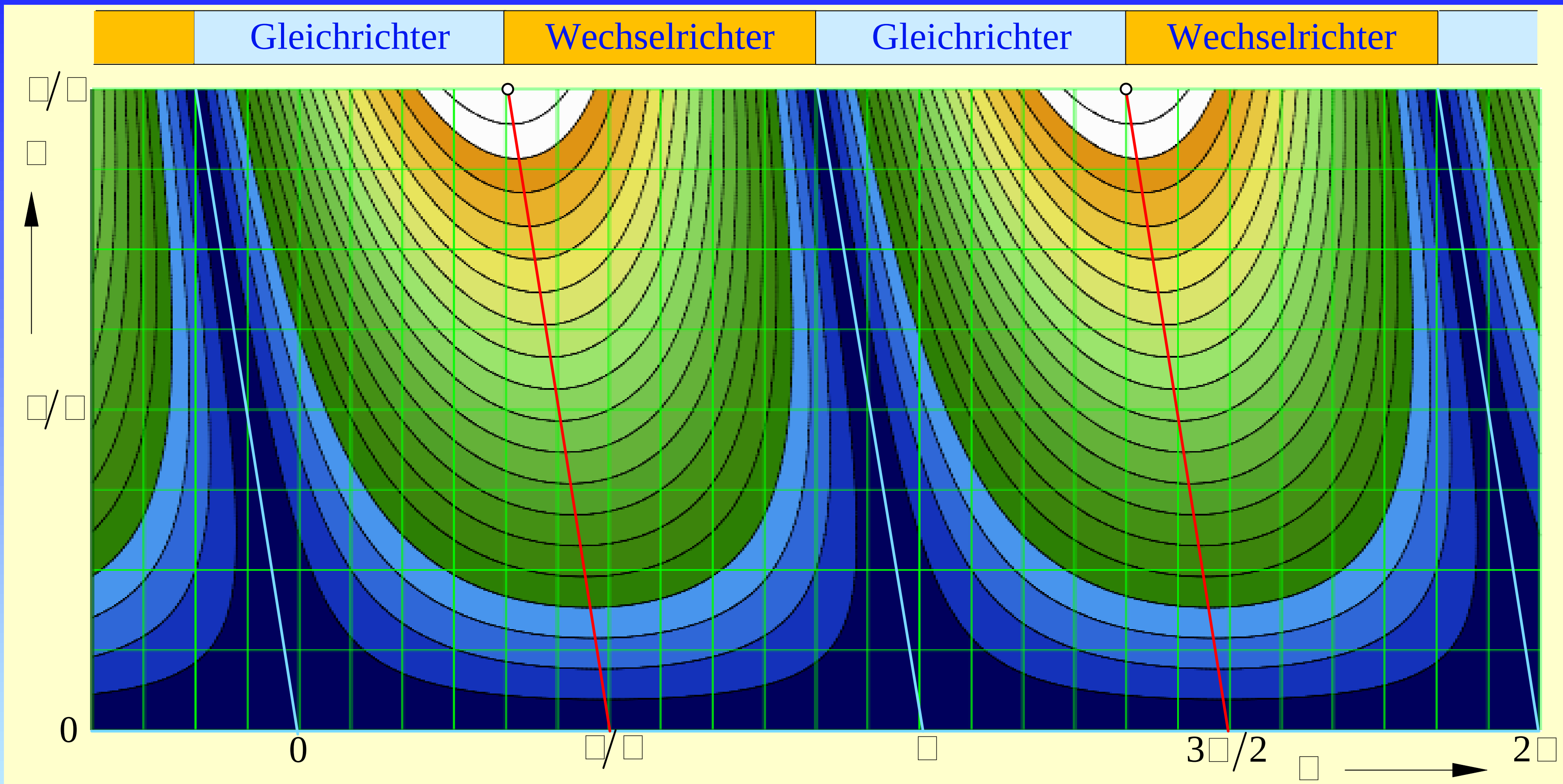
$$\left.\begin{array}{l} u_1 = 0 \\ u_4 = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow \quad u_{dk} = u_1 + u_4 = 0$$

Vier leitende Ventile treten auf, wenn die Kommutierungsdauer netzgeführter Stromrichter länger als die Gleichstromperiode ist.

Bei vernachlässigbaren Ventilzweigimpedanzen ist die maximale Kommutierungsdauer der Drehstrombrücke gleich der Gleichstromperiode.

$$b_{6p\max} = \frac{p}{3}$$

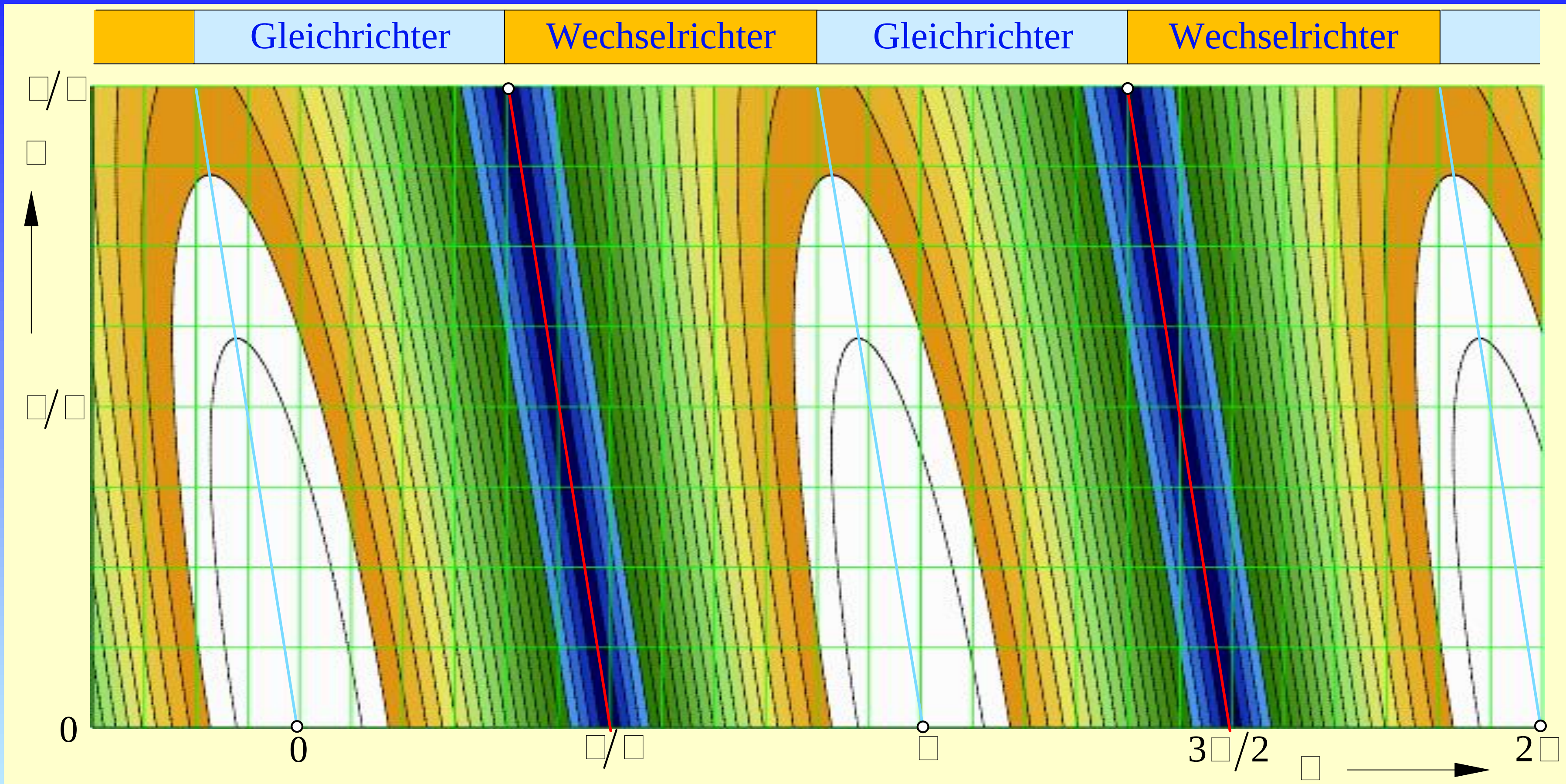
Gleichstrombetrag als $f(\alpha,\square)$



$$|i_{da}| = \frac{\sqrt{3}}{2}\left|e^{ja} - e^{j(a+b)}\right| \quad \text{mit} \quad |i_{da}|_{abs} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Isohypsenabstand $\Delta i_{da} = 0{,}05\,|i_{da}|_{abs}$

Gleichspannungsbetrag als $f(\alpha,$□$)$



$\left|u_{da}\right| = u_{di03}\left|\mathrm{e}^{\mathrm{j}a} + \mathrm{e}^{\mathrm{j}(a+b)}\right|$ mit $\left|u_{da}\right|_{abs} = 2\,u_{di03} = u_{di06}$

Isohypsenabstand $Du_{da} = 0{,}05\,u_{di06}$

Zeigerdiagramm des stationären Betriebes

Für den Steuerwinkel ist nur der Bereich von 0 bis □ mit positivem Gleichstrom von Interesse.

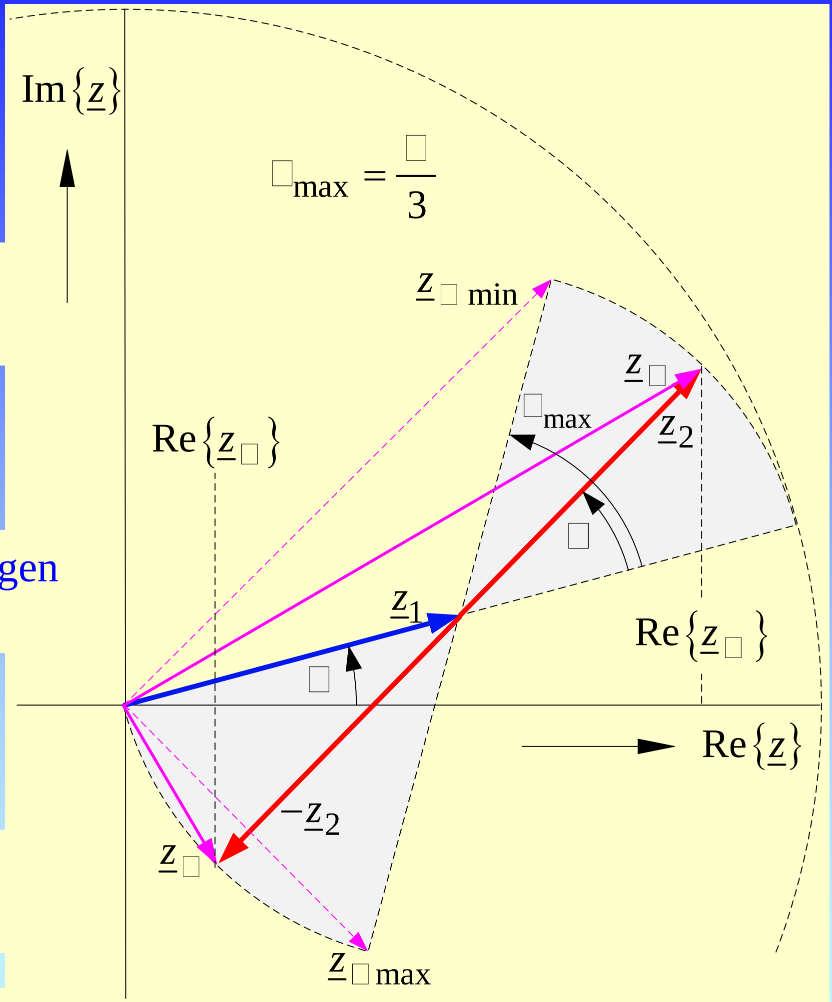
Der ideale stationäre Stromrichterbetrieb wird durch zwei komplexe Zahlen definiert:

$$\underline{z}_1 = \mathrm{e}^{\mathrm{j}a} \quad \text{und} \quad \underline{z}_2 = \mathrm{e}^{\mathrm{j}(a+b)}$$

Ihre Summe bestimmt die Gleichspannung und den flüchtigen Kommutierungsstrom und ihre Differenz den Gleichstrom.

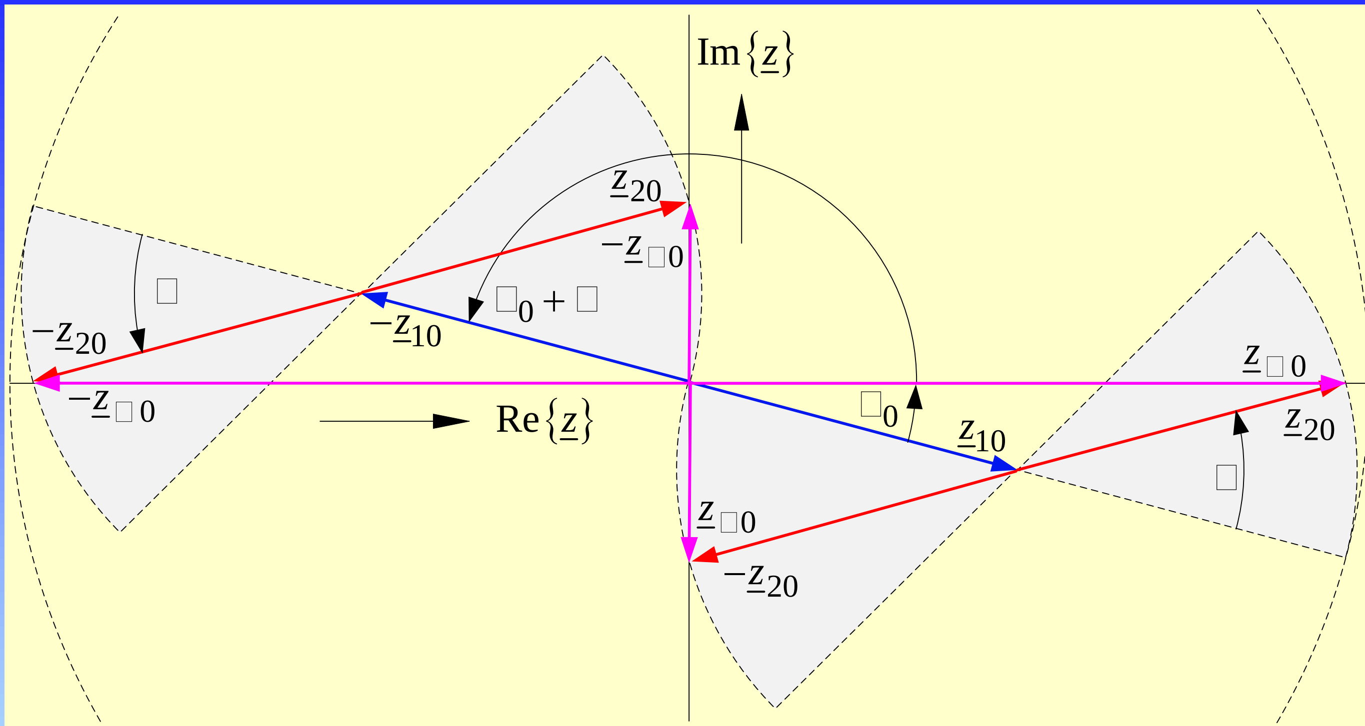
$$\underline{z}_S = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 \quad \text{und} \quad \underline{z}_D = \underline{z}_1 - \underline{z}_2$$

Summe & Differenz zweier betragsgleicher komplexer Zahlen sind stets orthogonal.



$$u_{da} = u_{di03}\,\mathrm{Re}\{\underline{z}_S\} = \frac{u_{di06}}{2}\mathrm{Re}\{\underline{z}_S\} \quad \text{und} \quad i_{da} = \frac{\sqrt{3}}{2}\mathrm{Re}\{\underline{z}_D\} \quad \text{sowie} \quad i_{kf} = -\frac{\sqrt{3}}{4}\mathrm{Re}\{\underline{z}_S\}$$

Leerlauflinien des stationären Betriebes



Gleichspannung entlang der Leerlauflinien

$$\Downarrow$$

$$u_{da0} = \pm u_{di06} \cos \frac{b}{2}$$

Im Leerlauf ist der Gleichstrom null.

Leer-lauf $\Rightarrow$ $i_{da0} = 0$ $\Leftarrow$ $\mathrm{Re}\{\underline{z}_{D0}\} = 0$, $\mathrm{Im}\{\underline{z}_{S\,0}\} = 0$

Gleichrichterbetrieb

$$a_{0G} = -\frac{b}{2}$$

Wechselrichterbetrieb

$$a_{0W} = a_{0G} + p = -\frac{b}{2} + p$$

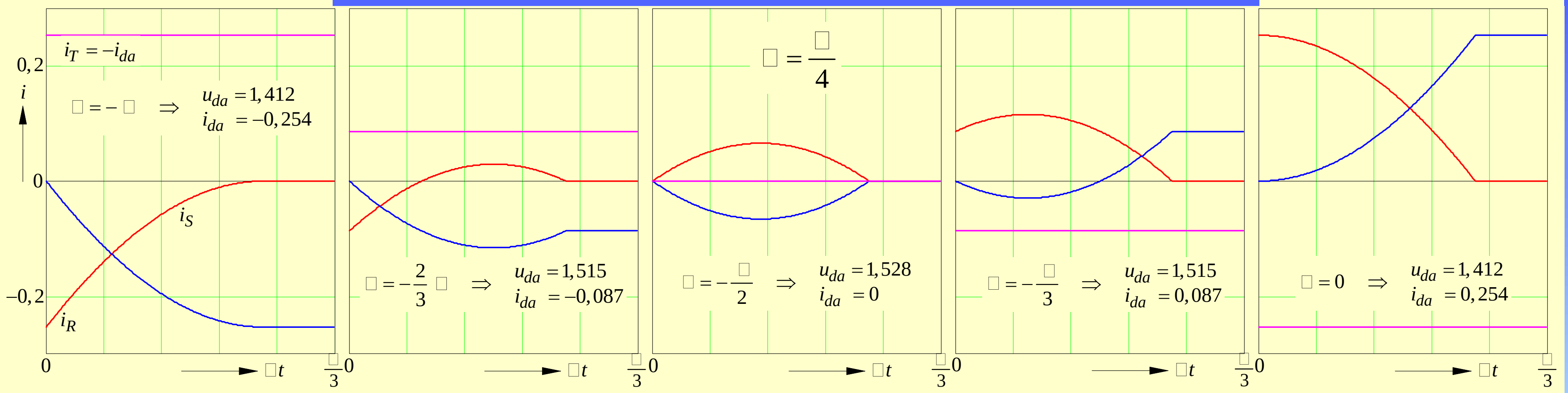
Ventillinien des stationären Betriebes

Die Richtungen des auf- & des abkommutierenden Stromes müssen infolge der Ventilwirkung gleich sein. In der näheren Umgebung der Leerlauflinien ist das aber nicht der Fall:

Wechselrichtergrenze für $i_{da} < 0$

$$i_{da\,0} = -i_T = 0 \quad \Rightarrow \quad i_R + i_T = 0 \quad \Rightarrow \quad i_R = -i_S$$

Gleichrichtergrenze für $i_{da} > 0$



Die mit Halbleiterventilen unzugänglichen Steuerwinkelbereiche liegen für *r* = 0 symmetrisch zu den Leerlauflinien.

theoretisch nutzbarer Steuerwinkelbereich $\Rightarrow$ $0 \le a \le p - b$

Gleichspannung & -strom entlang der Ventillinien $\Rightarrow$

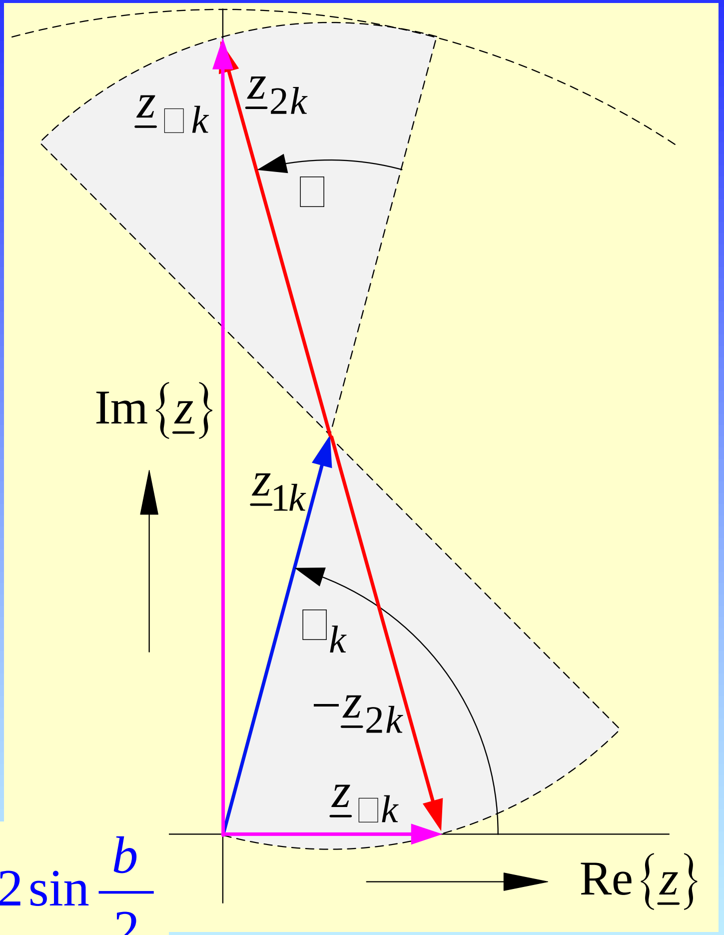
$$\begin{cases} u_{da\uparrow} = \pm u_{di03}\left(1 + \cos b\right) \\ i_{da\uparrow} = \dfrac{\sqrt{3}}{2}\left(1 - \cos b\right) \end{cases}$$

Kurzschlußlinie des stationären Betriebes

Im Kurzschluß ist die Gleichspannung null.

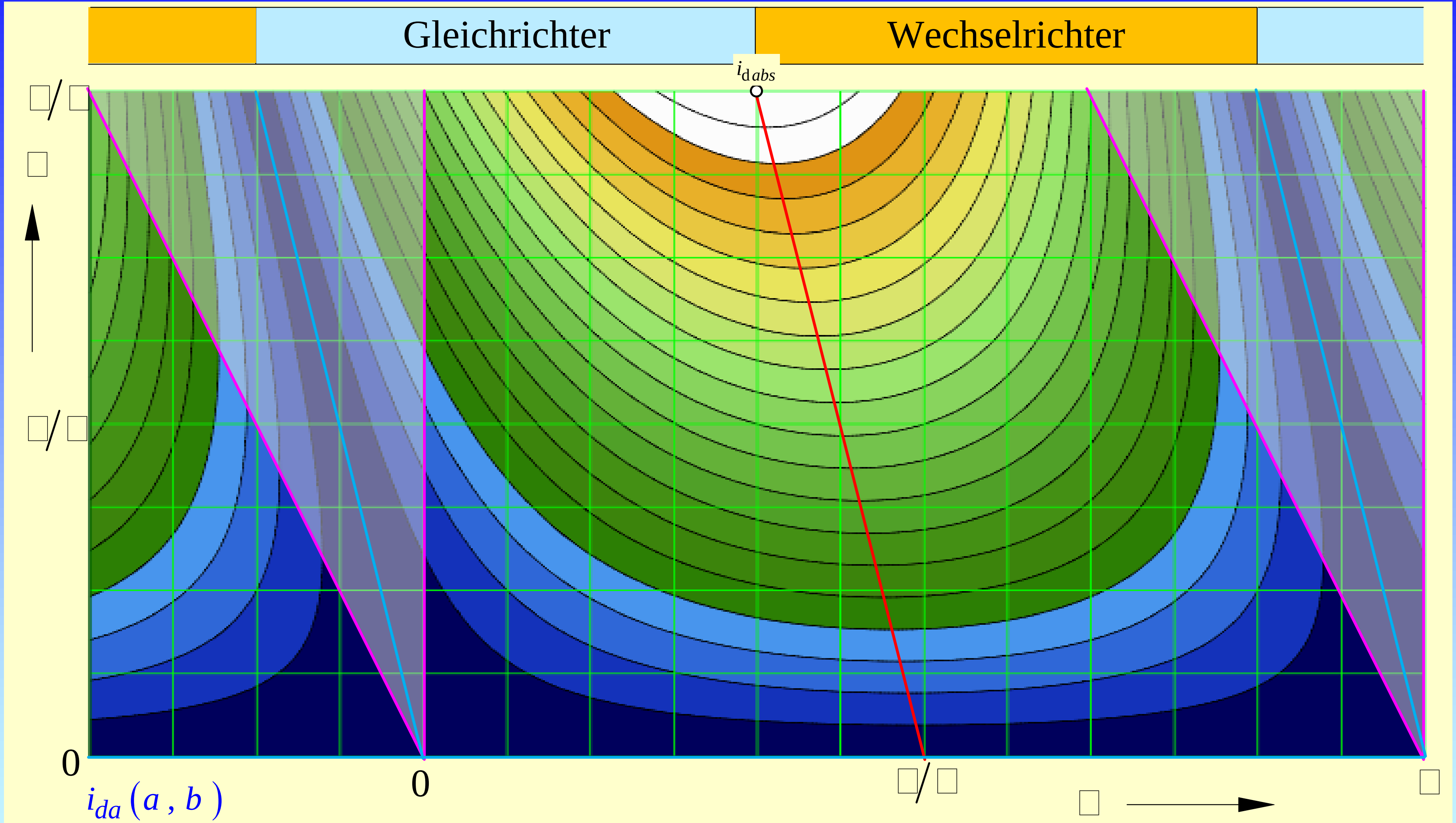
Kurz-schluß	$\Rightarrow$	$u_{dak} = 0$	$\Leftarrow$	$\mathrm{Im}\{\underline{z}_{Dk}\} = 0$ $\mathrm{Re}\{\underline{z}_{S\,k}\} = 0$

$$a_k = \frac{p}{2} - \frac{b}{2}$$



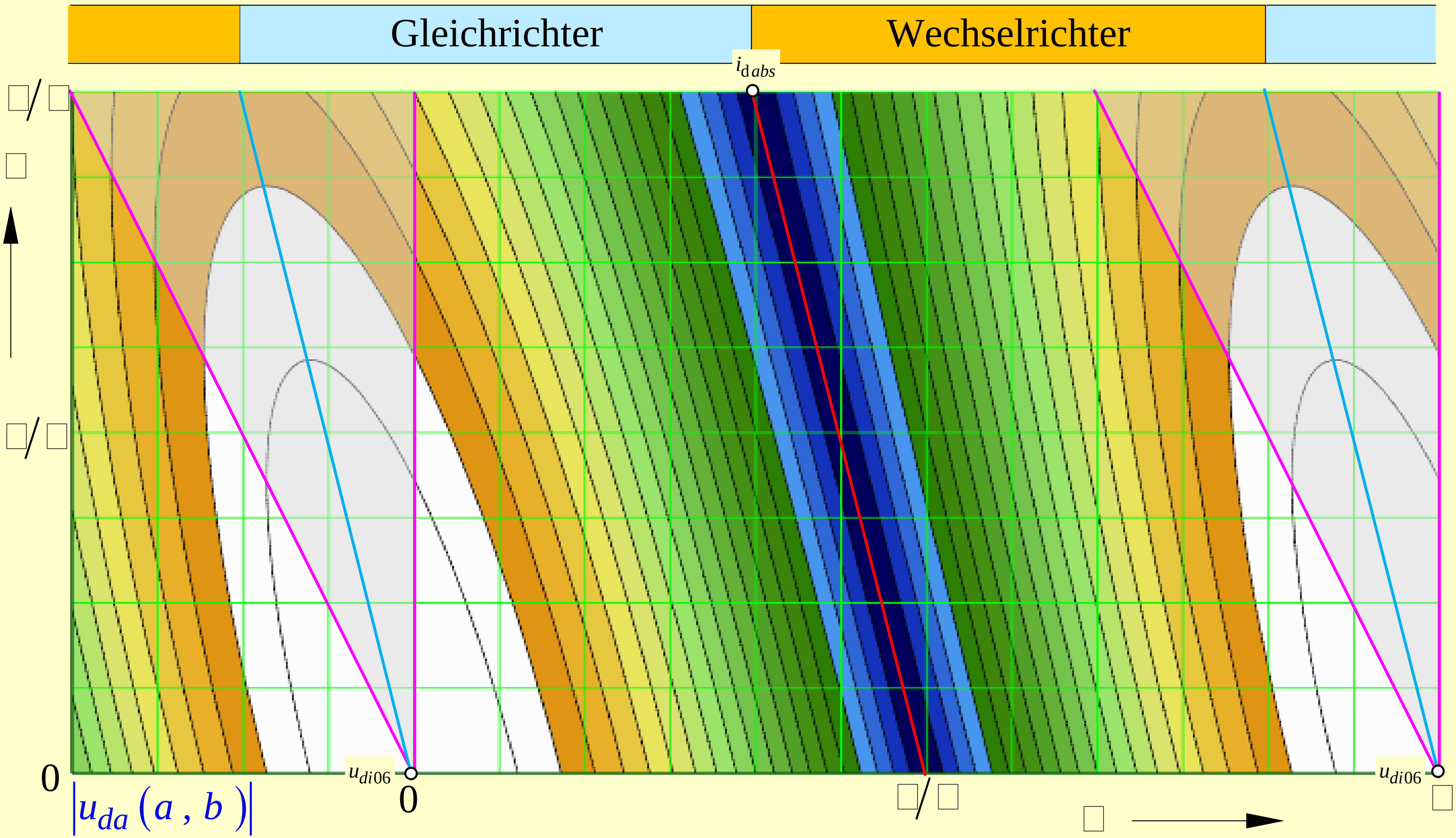
Gleichstrom entlang der Kurzschlußlinie $\Rightarrow$ $i_{dak} = \sqrt{3}\sin\dfrac{b}{2} = i_{d\,abs}\,2\sin\dfrac{b}{2}$

Gleichstromverlauf mit charakteristischen Linien



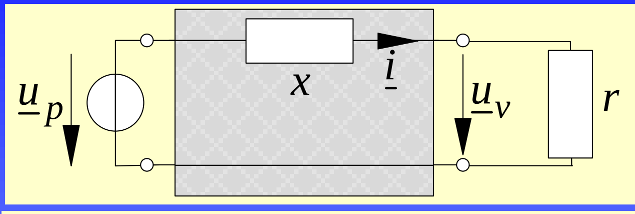
Isohypsenabstand $\Delta i_{da} = 0{,}05\, i_{dabs}$

Gleichspannungsverlauf mit charakter. Linien



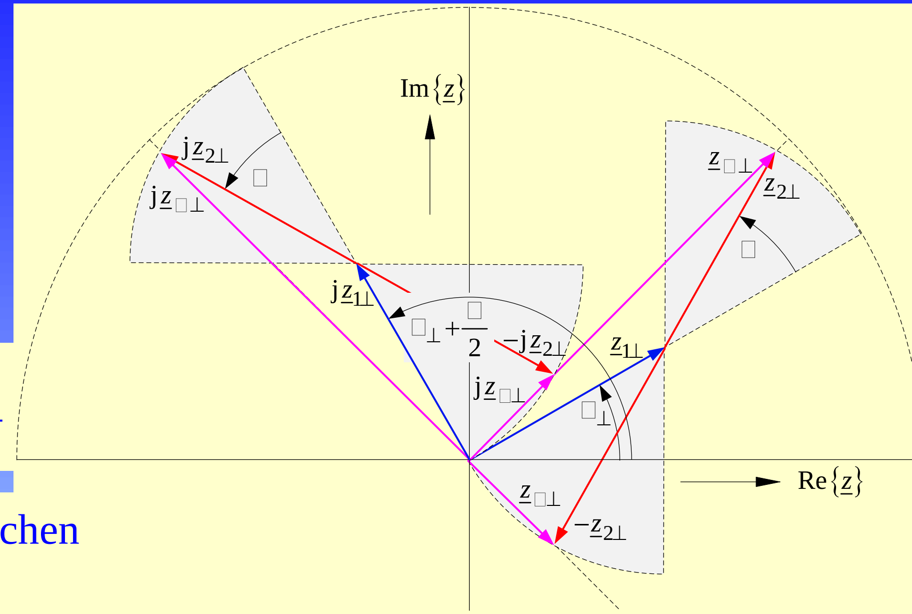
Isohypsenabstand $Du_{da} = 0{,}05\, u_{di06}$

Kipplinien des stationären Betriebes



Maximale Drehstrom-Wirkleistung an den Strom-richterklemmen im idealen System (Anpassung):

$$\underline{u}_v = \underline{i} = \frac{\sqrt{2}}{2}\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{p}{4}} \quad \Rightarrow \quad p_\perp = \mathrm{Re}\left\{\underline{u}_v \underline{i}^*\right\} = \mathrm{Re}\left\{\underline{u}_p \underline{i}^*\right\} = \frac{1}{2}$$



Die Stromrichter-Kipplinien liegen in der Mitte zwischen den Leerlauflinien & der Kurzschlußlinie

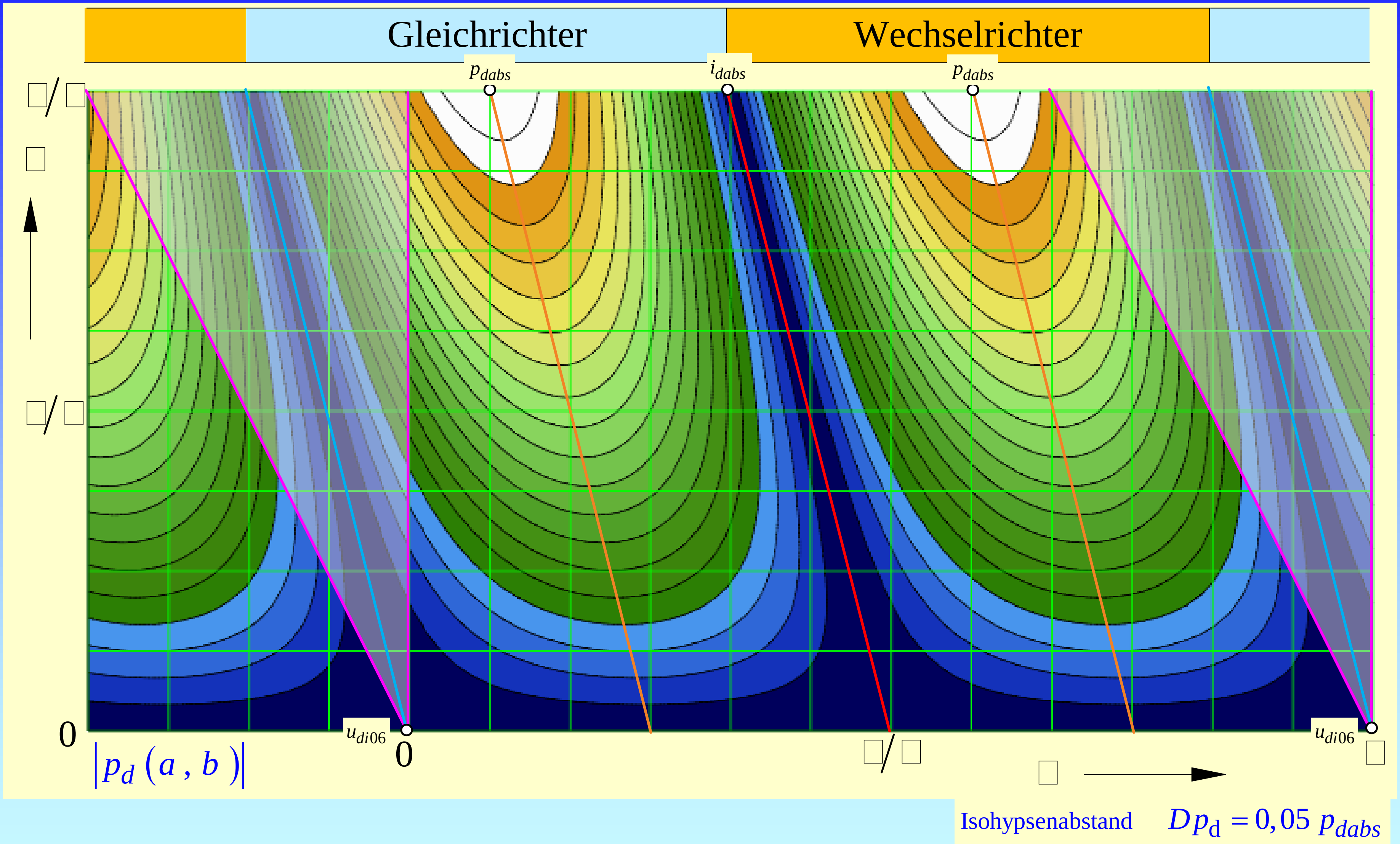
$$a_{\perp G} = -\frac{b}{2} + \frac{p}{4} \quad \text{und} \quad a_{\perp W} = -\frac{b}{2} + \frac{3p}{4} = a_{\perp G} + \frac{p}{2}$$

$$\mathrm{Re}\left\{\underline{z}_{S\perp}\right\} = -\mathrm{Re}\left\{\mathrm{j}\underline{z}_{S\perp}\right\} = \frac{\sqrt{2}}{2}\mathrm{Re}\left\{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{b}{2}} + \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{b}{2}}\right\} \quad \text{und} \quad \mathrm{Re}\left\{\underline{z}_{D\perp}\right\} = \mathrm{Re}\left\{\mathrm{j}\underline{z}_{D\perp}\right\} = \frac{\sqrt{2}}{2}\mathrm{Re}\left\{\mathrm{j}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{b}{2}} - \mathrm{j}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{b}{2}}\right\}$$

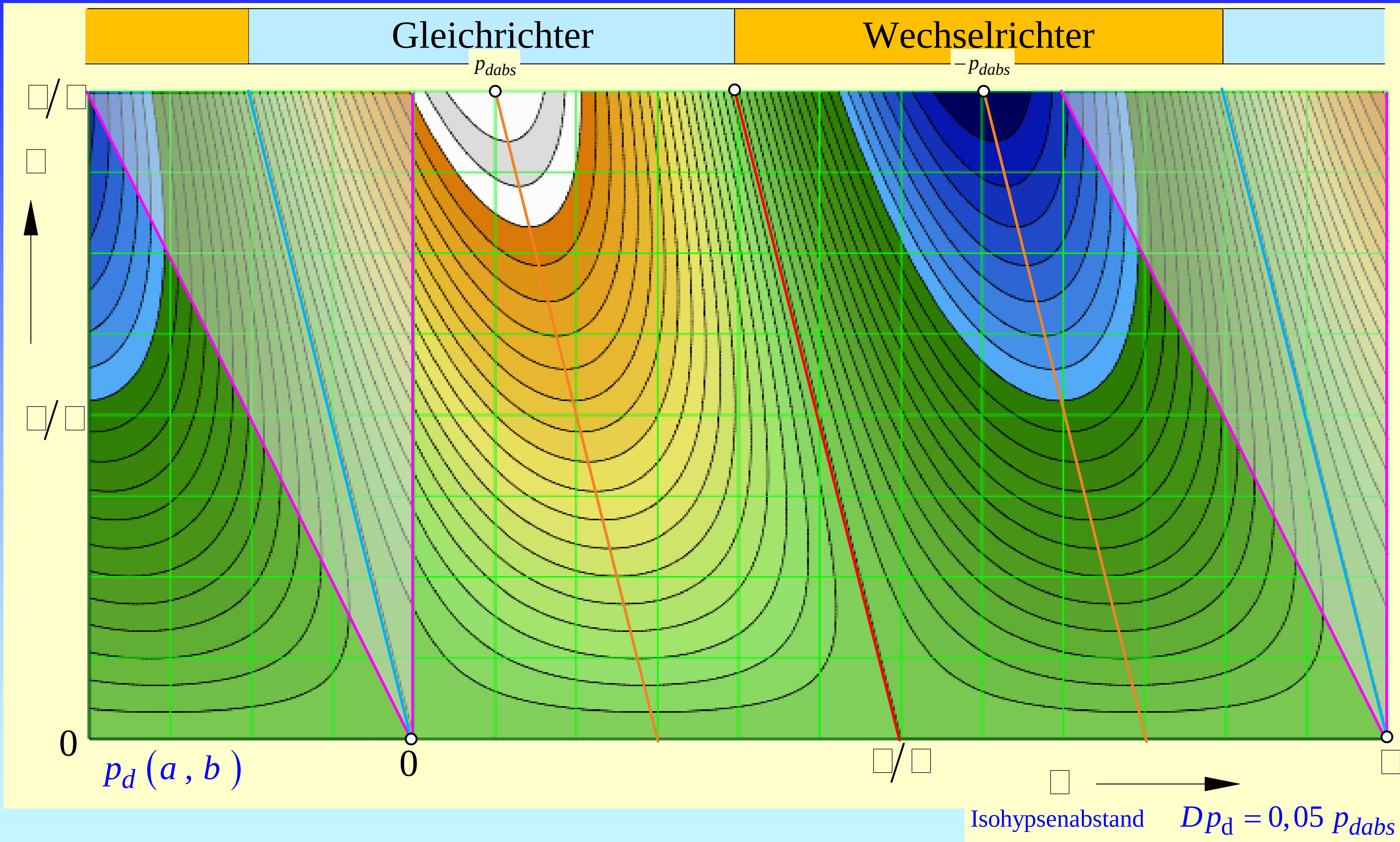
Leistungsverlauf entlang der Kipplinien $\Rightarrow \quad p_{d\perp} = \pm\frac{2}{3}u_{di03}\frac{\sqrt{3}}{2}\sin b = \pm\frac{3}{2p}\sin b \quad \Rightarrow \quad p_{dabs} = \frac{3\sqrt{3}}{4p} \approx 0{,}4135$

Die maximale Stromrichterleistung ist kleiner als die maximale Drehstromleistung.

Gleichstromleistungsbetrag mit charakter. Linien



Gleichstromleistung mit charakter. Linien



Leistungsgrößen des Drehstromnetzes

Grundschwingungsleistungen an den Stromrichterklemmen

$p = p_d$	Wirkleistung
$\underline{s}_{v1} = p_d + \mathrm{j}\, q_{v1} = \underline{u}_{v1}\, \underline{i}_1^*$	Grundschwingungs-Scheinleistung
$q_{v1} = \mathrm{Im}\{\underline{s}_{v1}\}$	Grundschwingungsblindleistung (Verschiebungsblindleistung)
$l_{v1} = \frac{p}{\lvert\underline{s}_{v1}\rvert} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + q_{v1}^2}}$	Grundschwingungsleistungsfaktor

Grundschwingungsleistungen an der Spannungsquelle

$p = p_d + p_v$	Wirkleistung
$\underline{s}_1 = p + \mathrm{j}\, q_1 = \underline{u}_p\, \underline{i}_1^*$	Grundschwingungs-Scheinleistung
$q_1 = \mathrm{Im}\{\underline{s}_1\}$	Grundschwingungsblindleistung (Verschiebungsblindleistung)
$l_1 = \frac{p}{\lvert\underline{s}_1\rvert} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + q_1^2}}$	Grundschwingungsleistungsfaktor

ebenso am Verknüpfungspunkt h

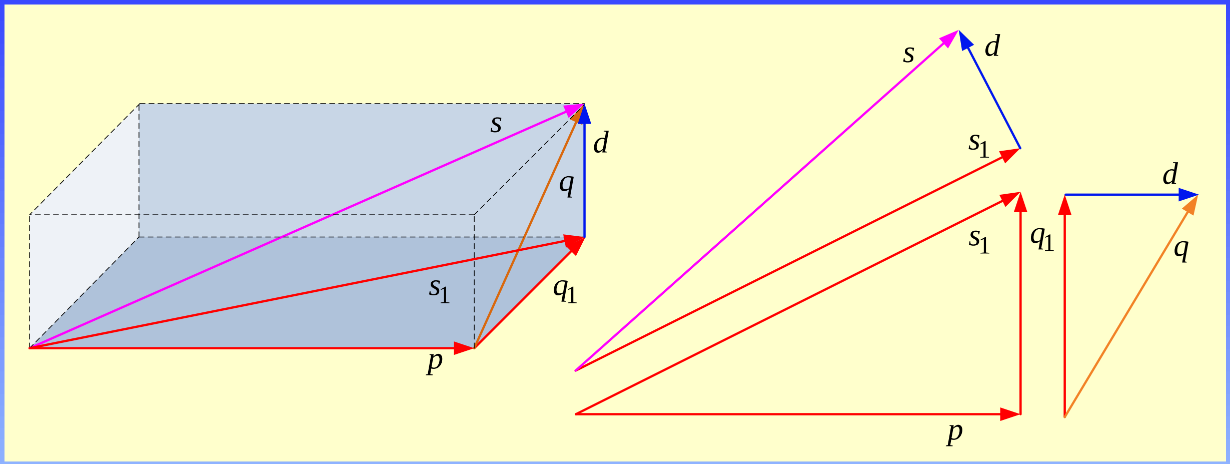
Totale Scheinleistung, Blindleistung und Leistungsfaktor

$$s = u_e\, i_e \quad \Rightarrow \quad s^2 = p^2 + q^2 \quad \text{und} \quad l = \frac{p}{s}$$

Die Leistungsgrößen lassen sich für jeden Punkt zwischen Drehstrom-Spannungsquelle & Stromrichter bestimmen.

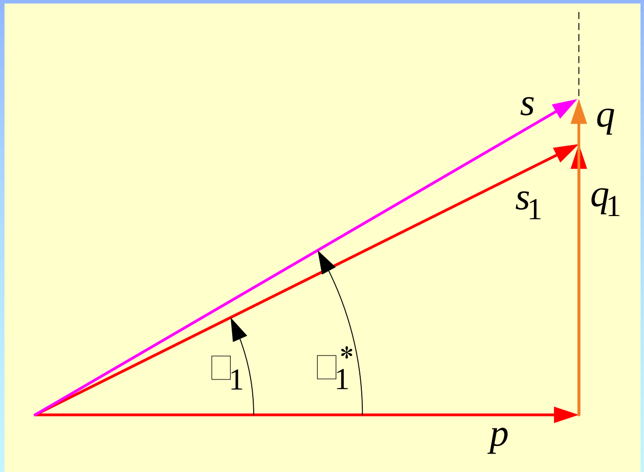
Zerlegung der Leistungsgrößen

Die Ursachen für die Blindleistung sind Verschiebung & Verzerrung



$$s^2 = s_1^2 + d^2 = \underbrace{p^2 + q_1^2}_{s_1^2} + d^2 = p^2 + q^2$$

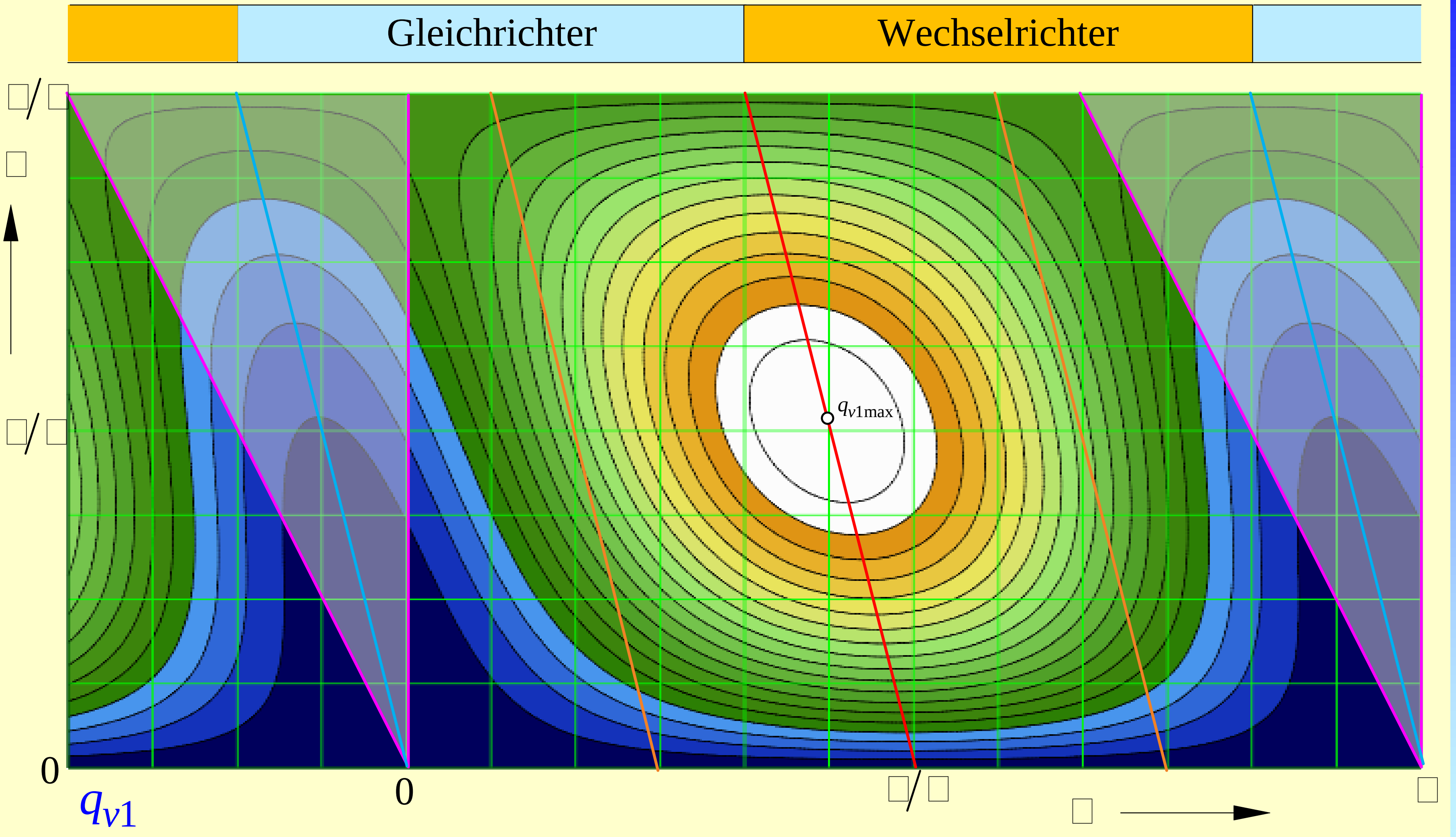
$$s_1^2 = p^2 + q_1^2 \quad \text{und} \quad s^2 = p^2 + q^2$$



Wenn die totale Blindleistung als Verschiebungsblindleistung interpretiert wird, erhält man für den Stromrichter ein Lastmodell, das bei Lastflußberechnungen Ergebnisse auf der „sicheren“ Seite liefert.

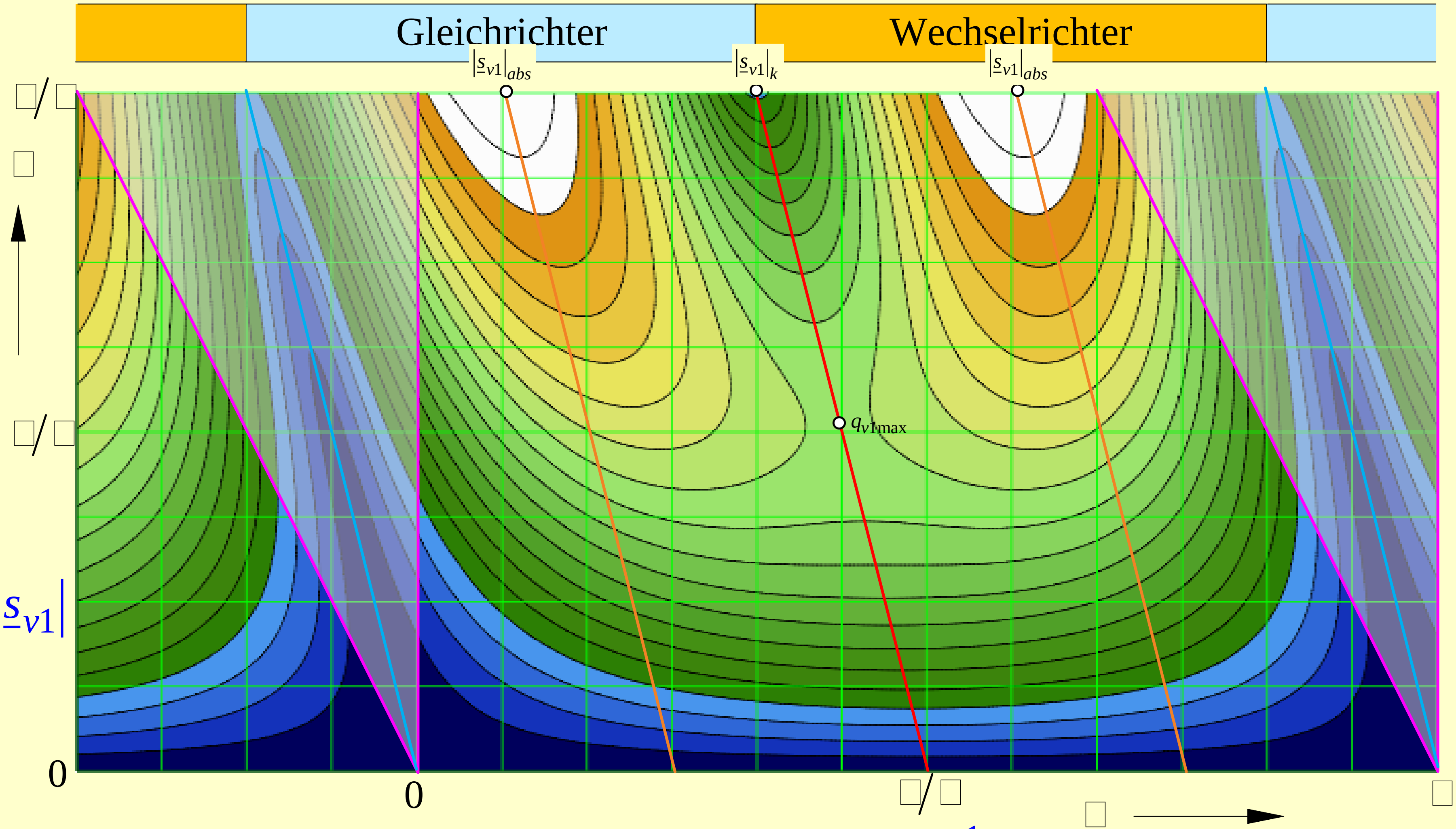
$$P = S \cos j_1^{*} \quad \text{wie auch} \quad P = S_1 \cos j_1 \quad \text{mit} \quad \cos j_1^{*} = l$$

Grundschwingungsblindleistung am Stromrichter



Isohypsenabstand $Dq_{v1} = 0,05\ q_{v1\max}$

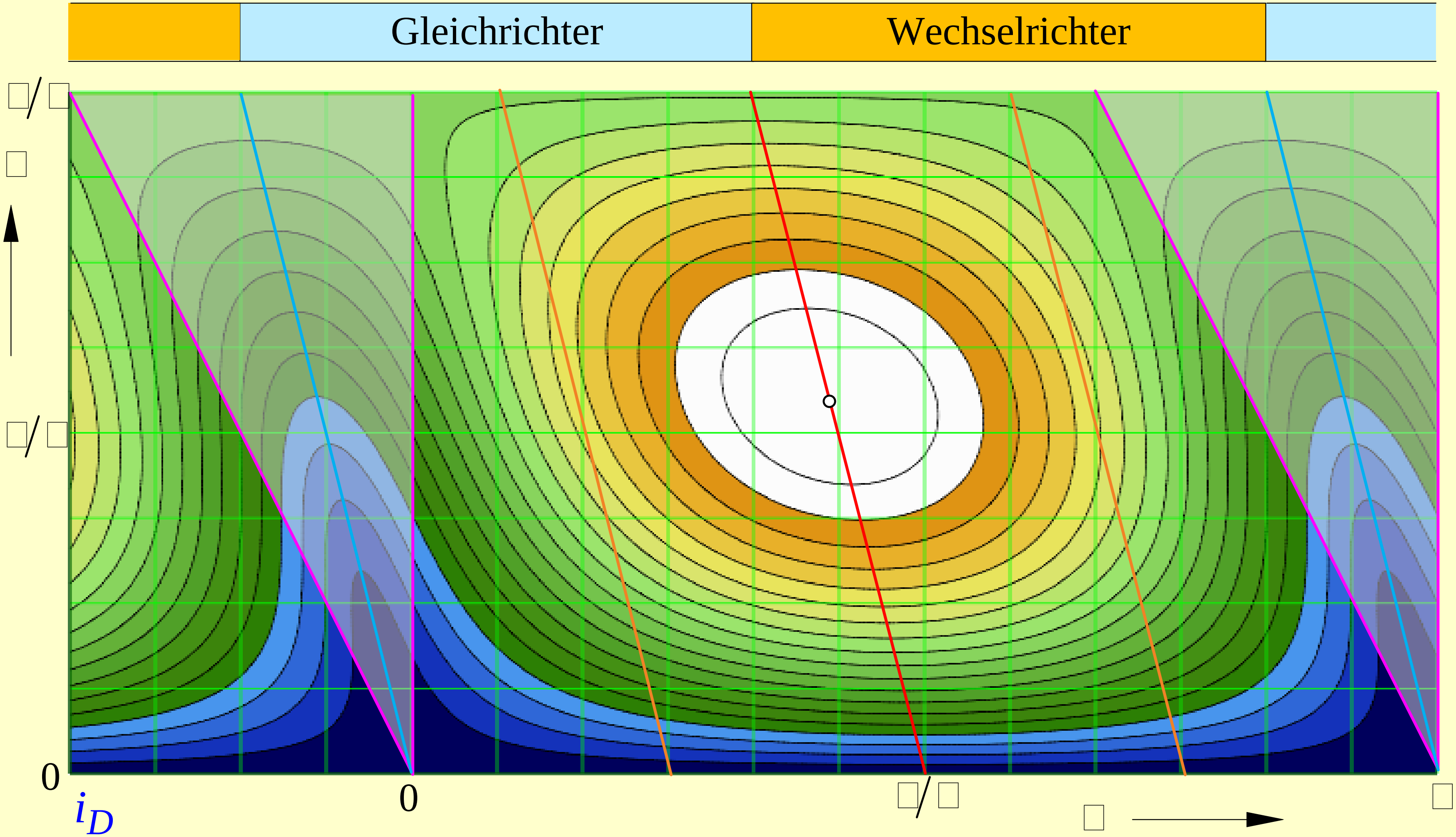
Grundschwingungsscheinleistung am Stromrichter



$|\underline{s}_{v1}|_{abs} = 0{,}421 > p_{dabs}$ und $|\underline{s}_{v1}|_{k} = q_{v1k} = 0{,}079$ bzw. $q_{v1\max} = \frac{1}{4}$

Isohypsenabstand $D|\underline{s}_{v1}| = 0{,}05\,|\underline{s}_{v1}|_{abs}$

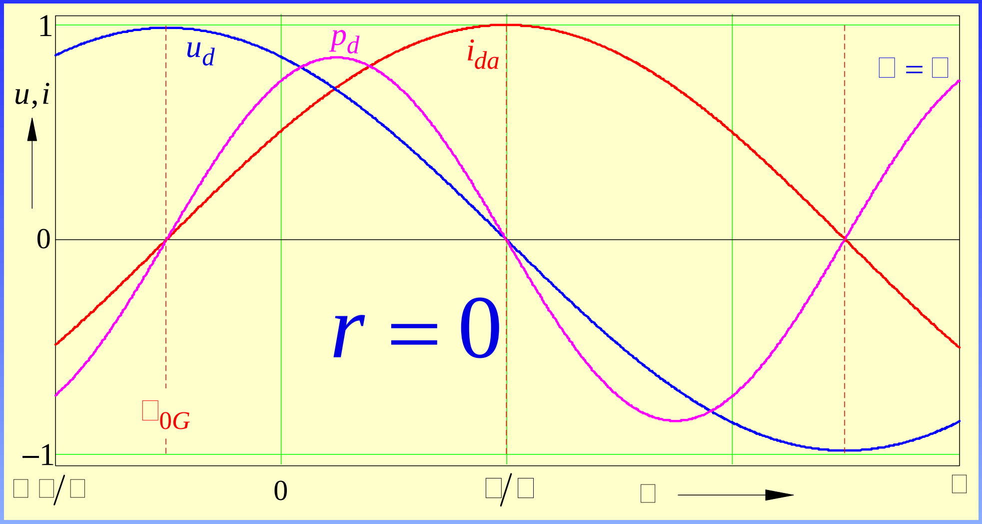
Verzerrungsstrom



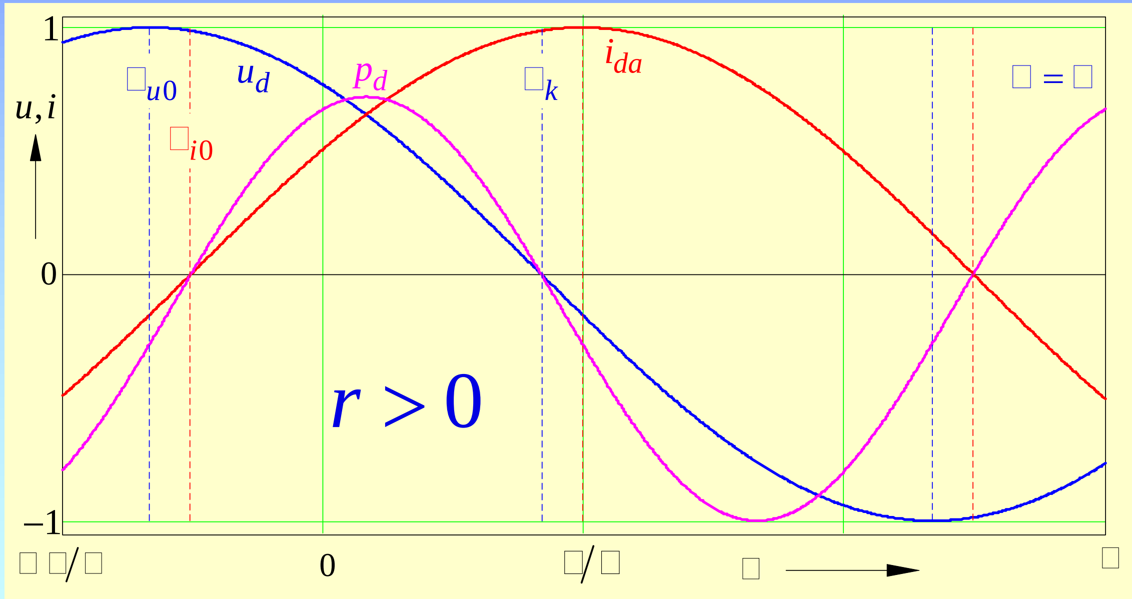
$i_{D\max} = 0{,}084$ Kurzschlußlinie

Isohypsenabstand $\Delta i_D = 0{,}05\, i_{D\max}$

Wirkung ohmscher Widerstände im System



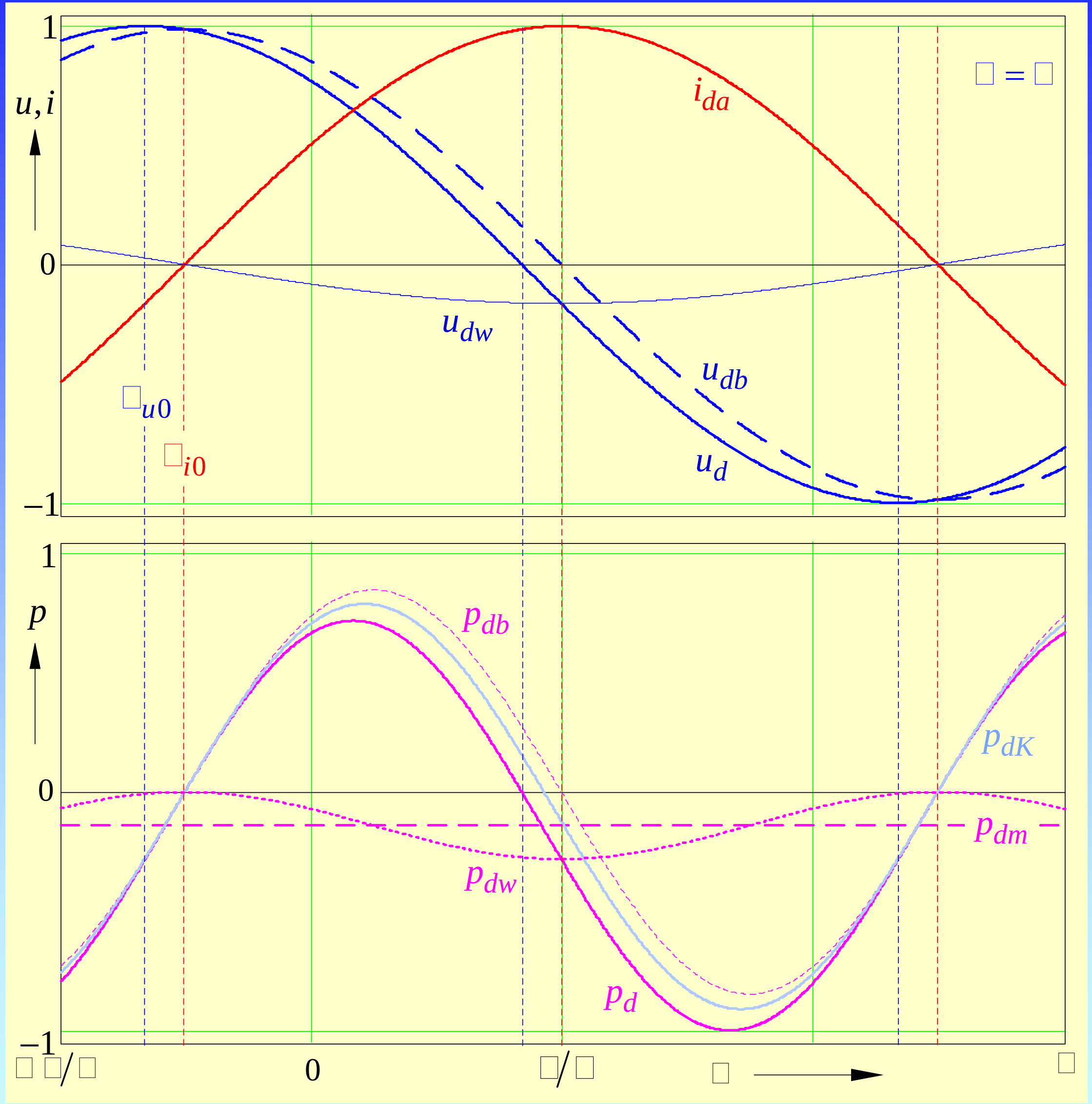
Im induktiven System sind Gleichstrom & Gleichspannung orthogonale Funktionen des Steuer- & des Kommutierungswinkels.
Durch einen ohmschen Spannungsabfall sind beide voneinander abhängig.



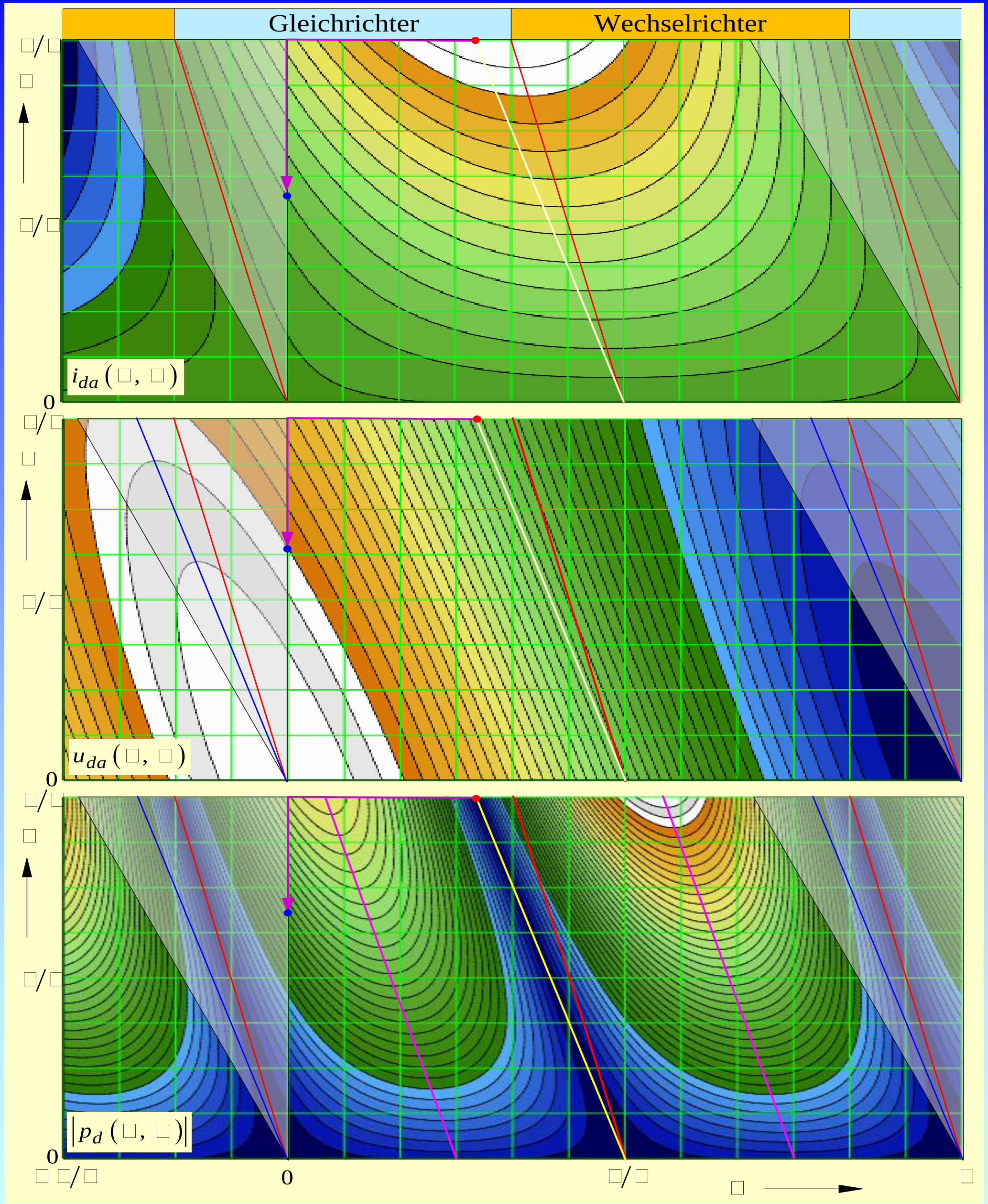
Mit dem Nulldurchgang der Spannung verschieben sich die Kurzschluß- und die Leerlauflinie der Spannung. Die charakteristischen Linien des Stromes ändern sich nicht.
Der Mittelwert der Gleichleistung ist negativ.

Orthogonale Komponenten der Spannung zum Strom

Die Spannung ist in orthogonale Komponenten in Bezug zum Strom zerlegbar.
Damit lassen sich auch orthogonale Leistungsgrößen angeben.



Gleichgrößen im ohmsch-induktiven System

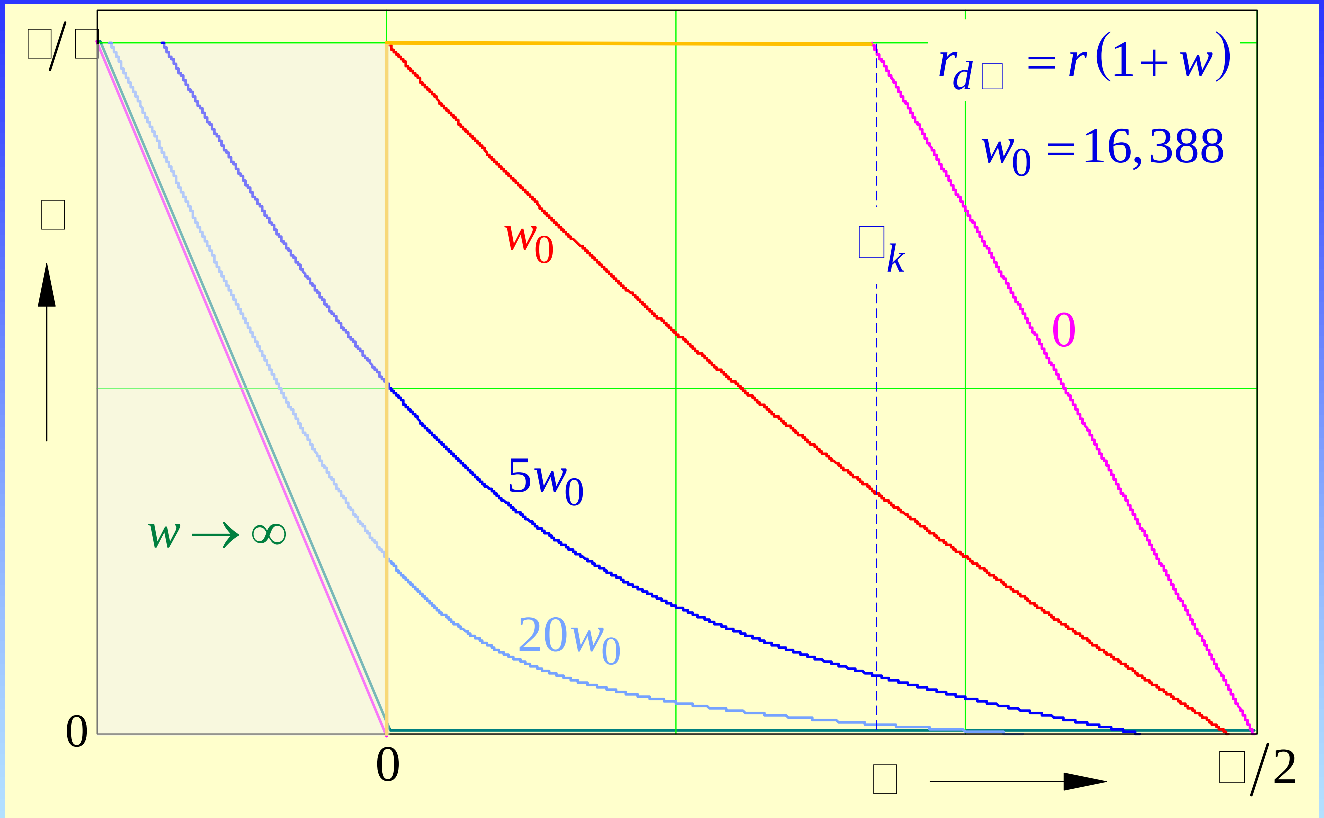


Die charakteristischen Linien des Stromes bleiben in sehr guter Näherung erhalten, die der Spannung verlaufen flacher.
Die Kipplinien liegen jeweils in der Mitte zwischen Kurzschluß- & Leerlauflinie.
Die Kippleistung ist im Wechselrichter-betrieb höher als im Gleichrichterbetrieb

Drehstrombrücke mit ohmscher Last

Eine ungesteuerte Brücke arbeitet bei Kurzschluß im absoluten Kurzschlußpunkt. Der Gleichstrom kann durch die Steuerung zwischen $\square_k$ & π/2 vom maximalen Kurzschlußstrom auf null verändert werden.

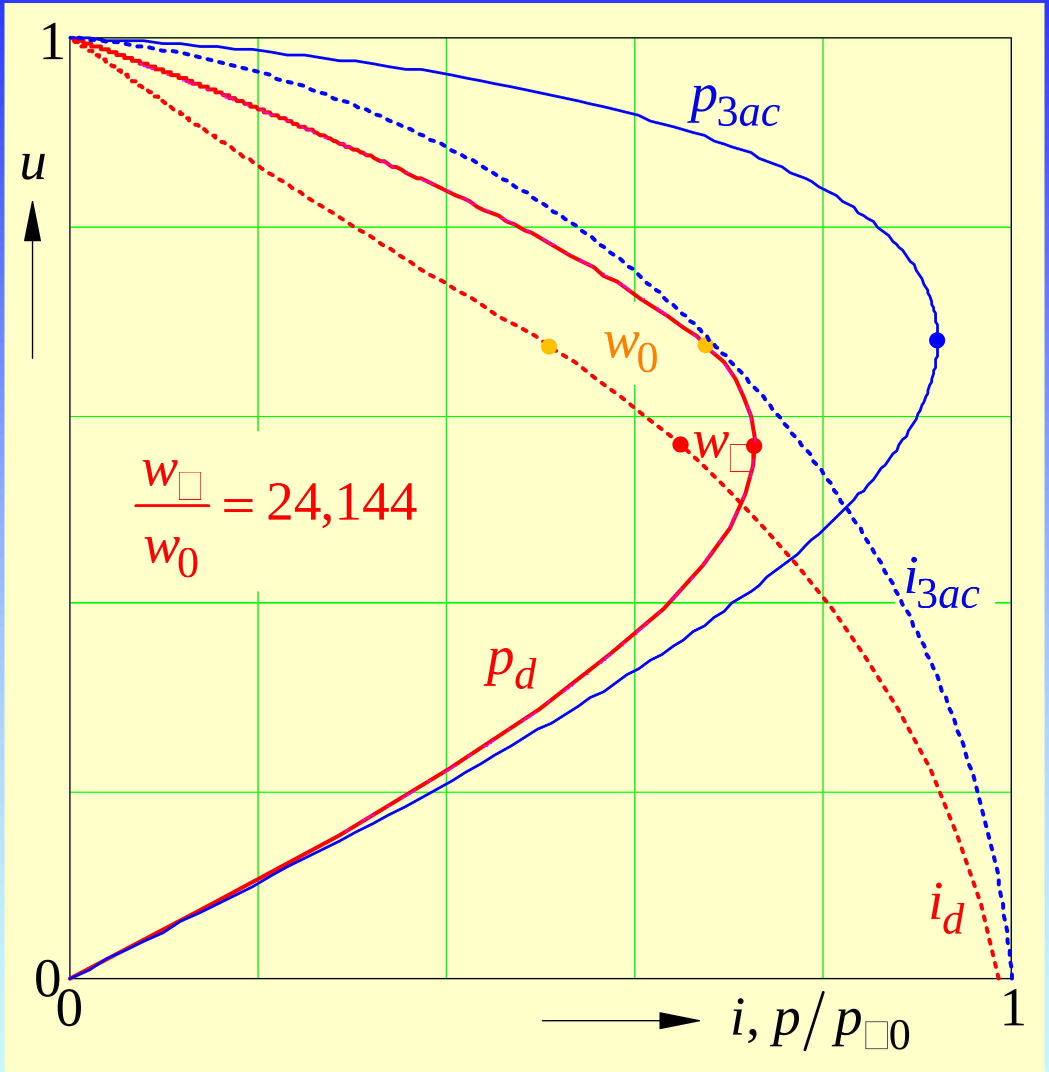
Der Steuerwinkel ist nicht frei wählbar.



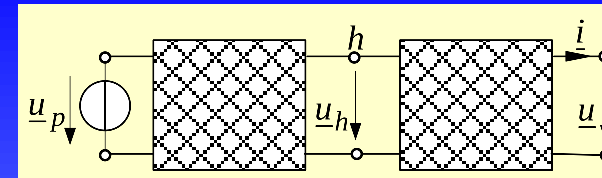
Vergrößert man den Widerstand vom absoluten Kurzschlußpunkt an, dann bleibt der Kommutierungswinkel bis zur Ventillinie zunächst maximal und die Kurzschlußlinie verläuft mit zunehmender Krümmung immer flacher. Ab der Ventillinie bleibt der Steuerwinkel null und der Kommutierungswinkel nimmt ab, aber die vollständige Kurzschlußlinie hat im nicht zugänglichen Bereich ihre Fortsetzung. Sie schmiegt sich mit steigendem Widerstand an die Leerlauflinie und die Linie □=0 an.

Betriebs-Kennlinien der DB im Gleichrichterbetrieb

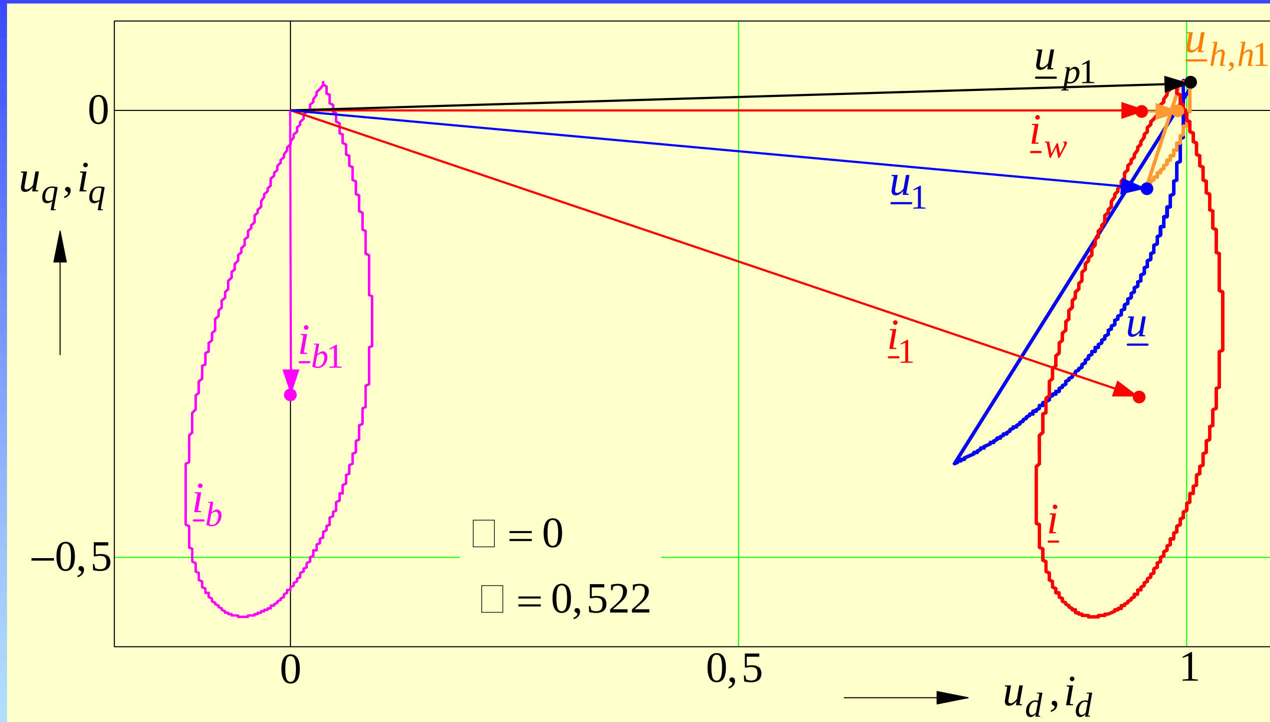
Die Strom-Spannungs- & die Spannungs-Leistungs-Kennlinien sind für ein Stromrichtersystem in der gleichen Weise angebbar wie für ein symmetrisches Drehstromsystem.
Die Stromrichter-Kippleistungen sind kleiner als die Drehstrom-Kippleistungen, d.h., die Übertragungsfähigkeit des Stromrichtersystems ist geringer als die des symmetrischen Drehstromsystems.



Zeigerdiagramm eines ohmsch-induktiven Stromrichtersystems



Die Grundschwingungen der Ströme & Spannungen sind die Mittelwerte ihrer Raumzeiger im synchron umlaufenden Koordinatensystem.
Im p-pulsigen Stromrichtersystem sind die Raumzeigerbahnen in der komplexen Ebene mit p-facher Betriebsfrequenz periodisch.

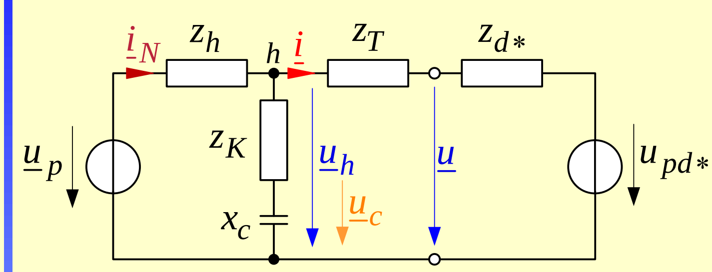


Wollte man die Netzrückwirkungen des Stromrichters am Verzweigungspunkt *h* vollständig kompensieren, benötigte man einen Kompensatorstrom, der den dargestellten Blindstrom zu null ergänzt.

$$\underline{i}_K = -\underline{i}_b = -\underline{i} + \underline{i}_w \quad \text{mit} \quad \underline{i}_w = \mathrm{Re}\left\{\underline{i}_1 \, e^{-\mathrm{j}\arg\left(\underline{u}_{h1}\right)}\right\}$$

Schwingungsfähiges Stromrichtersystem

Das einfachste schwingungsfähige Stromrichtersystem ist ein ohmsch-induktives mit Reihenresonanzkreis. Es besitzt drei Zustandsgrößen-Raumzeiger.



	dk	de	k	l
z_{d*}	$\frac{2}{3} z_d$	$\frac{1}{2} z_d$	0	$\to \infty$
u_{pd*}	$\frac{2}{3} u_d$	$\frac{1}{2} u_d$	0	0

Allgemeine Zustandsgleichung der Ersatzstromkreise

$$\begin{pmatrix} u_p \\ 0 \\ u_p \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u_{pd*} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_h + r_K & 1 & -r_K \\ x_c & 0 & -x_c \\ r_h & 0 & r_T + r_{d*} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_N \\ u_c \\ i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_h + x_K & 0 & -x_K \\ 0 & -1 & 0 \\ x_h & 0 & x_T + x_{d*} \end{pmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}wt} \begin{pmatrix} i_N \\ u_c \\ i \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{pd*} = \mathbf{R}\,\mathbf{v} + \mathbf{X}\frac{\mathrm{d}\,\mathbf{v}}{\mathrm{d}wt} \quad \Rightarrow \quad \frac{\mathrm{d}\,\mathbf{v}}{\mathrm{d}wt} = -\mathbf{X}^{-1}\mathbf{R}\,\mathbf{v} + \mathbf{X}^{-1}\left(\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{pd*}\right)$$

Eigenwerte

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} -d_c + \mathrm{j}n \\ -d_c - \mathrm{j}n \\ -d_r \end{pmatrix}$$

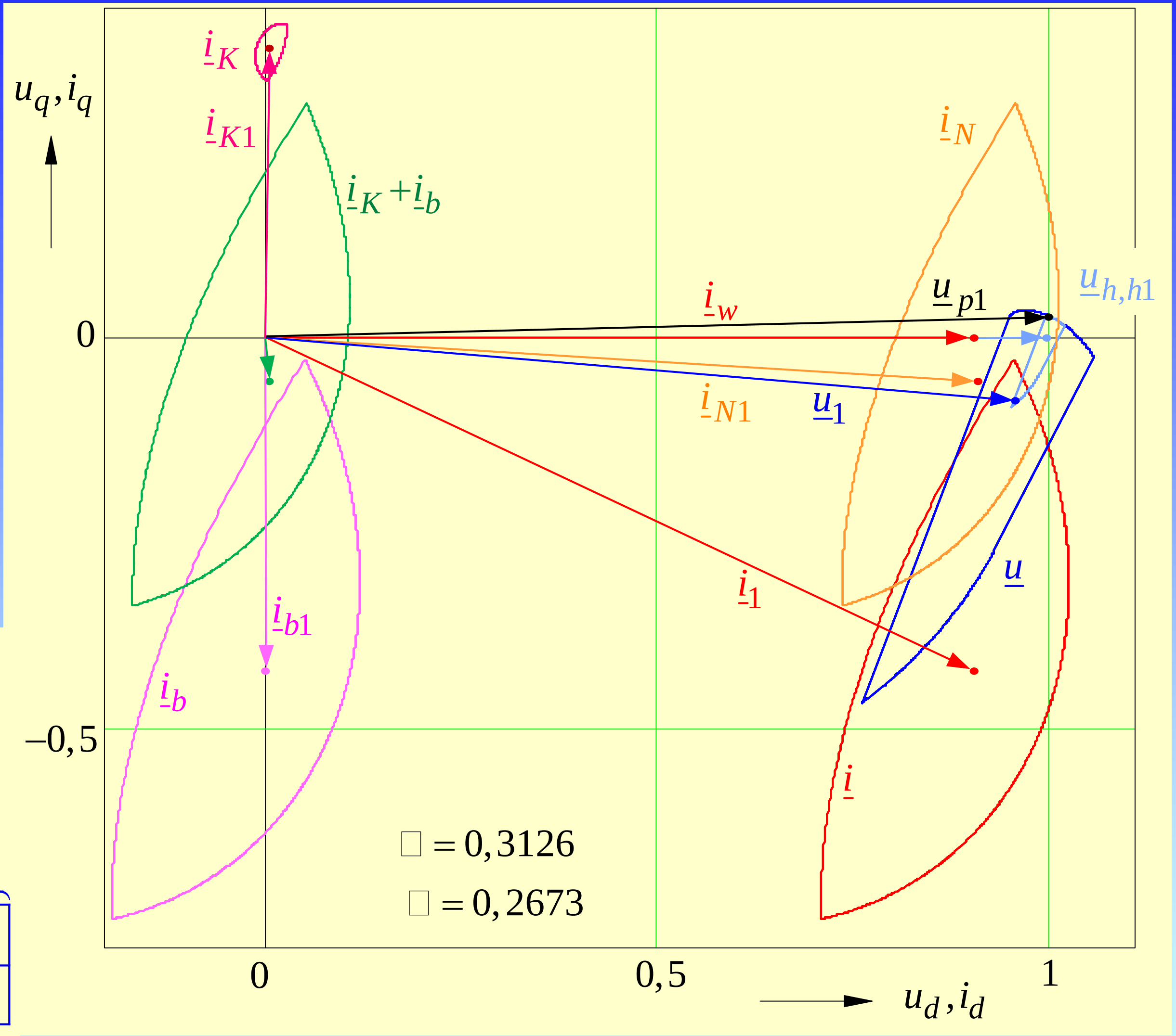
Im Leerlaufkreis entfällt der Stromrichterstrom als Zustandsgröße, sodaß das System insgesamt elf Zustandsgrößen besitzt, die über die Bedingungen des stationären Betriebes miteinander verknüpft sind.

Mit ωt als unabhängige Variable sind die Eigenwerte auf die Betriebskreisfrequenz bezogen.

$$\underline{p} = \underbrace{\underbrace{-d}_{\text{Dämpfung}} + \mathrm{j}\overbrace{\sqrt{d^2 - \underbrace{n_0}_{\text{Resonanzfrequenz}}{}^2}}^{\text{Eigenfrequenz}}}_{\text{komplexer Eigenwert}}$$

Verdrosselte Kondensatoranlage

Der Reihenresonanzkreis wird auf eine Frequenz abgestimmt, die im Stromrichtersystem als harmonische Frequenz nicht auftreten kann, um die Kondensatoren vor zu hoher Belastung durch höhere Stromharmonische zu schützen.



Resonanzfrequenz des Kondensatorzweiges

$$\overbrace{n_{0K} = 3}^{}$$

$$\Downarrow$$

Systemeigenfrequenzen

n_l	n_{dk}	n_{de}	n_k
2,8765	2,8861	2,8880	2,9056

Saugkreisanlage

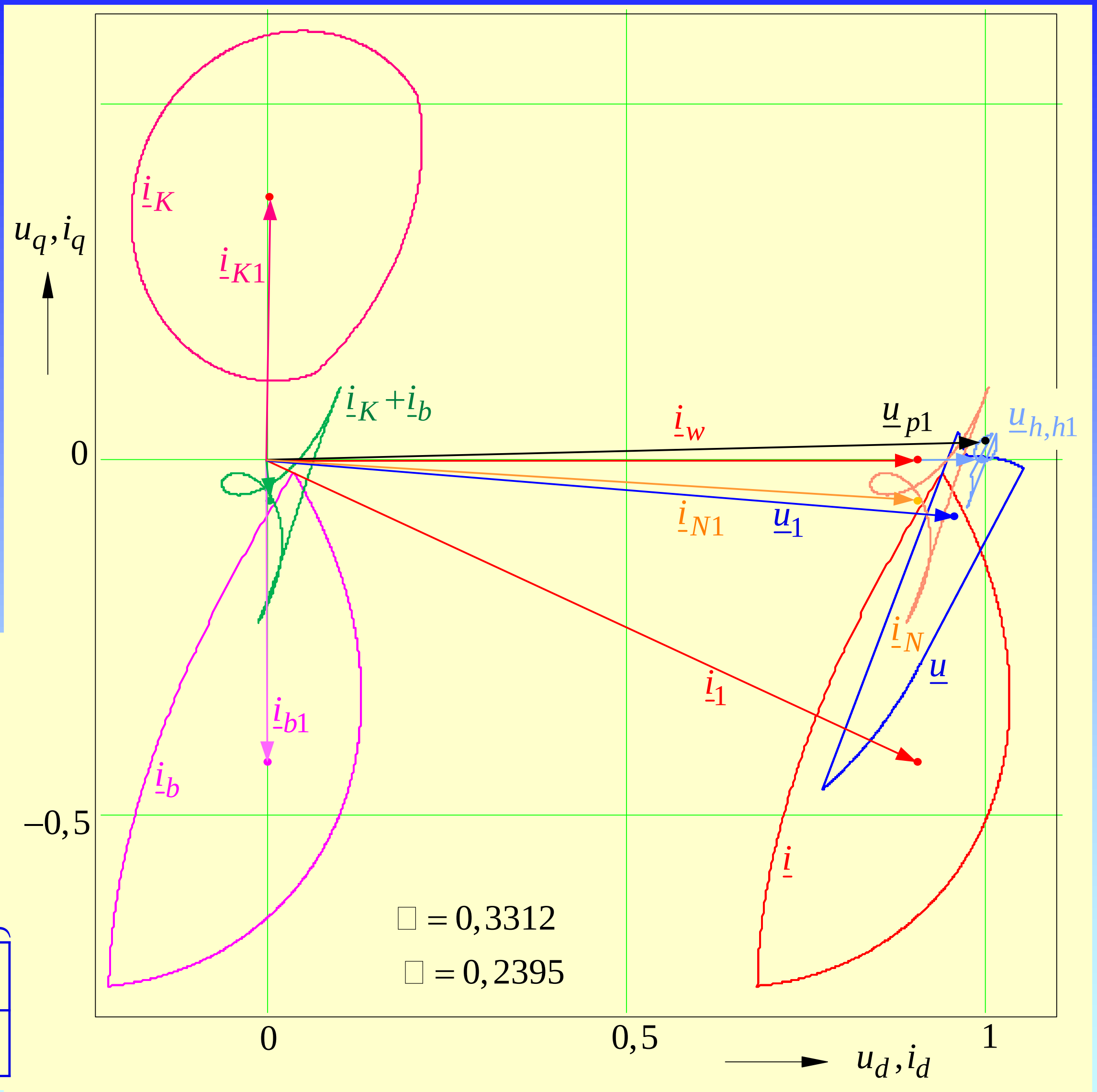
Der Reihenresonanzkreis wird auf die niedrigste Frequenz abgestimmt, die im System als harmonische Frequenz auftritt, um zusätzlich zur Verschiebungsblindleistung auch Verzerrung zu kompensieren.

$$\overbrace{n_{0K}=5}^{\text{Resonanzfrequenz des Kondensatorzweiges}}$$

$$\Downarrow$$

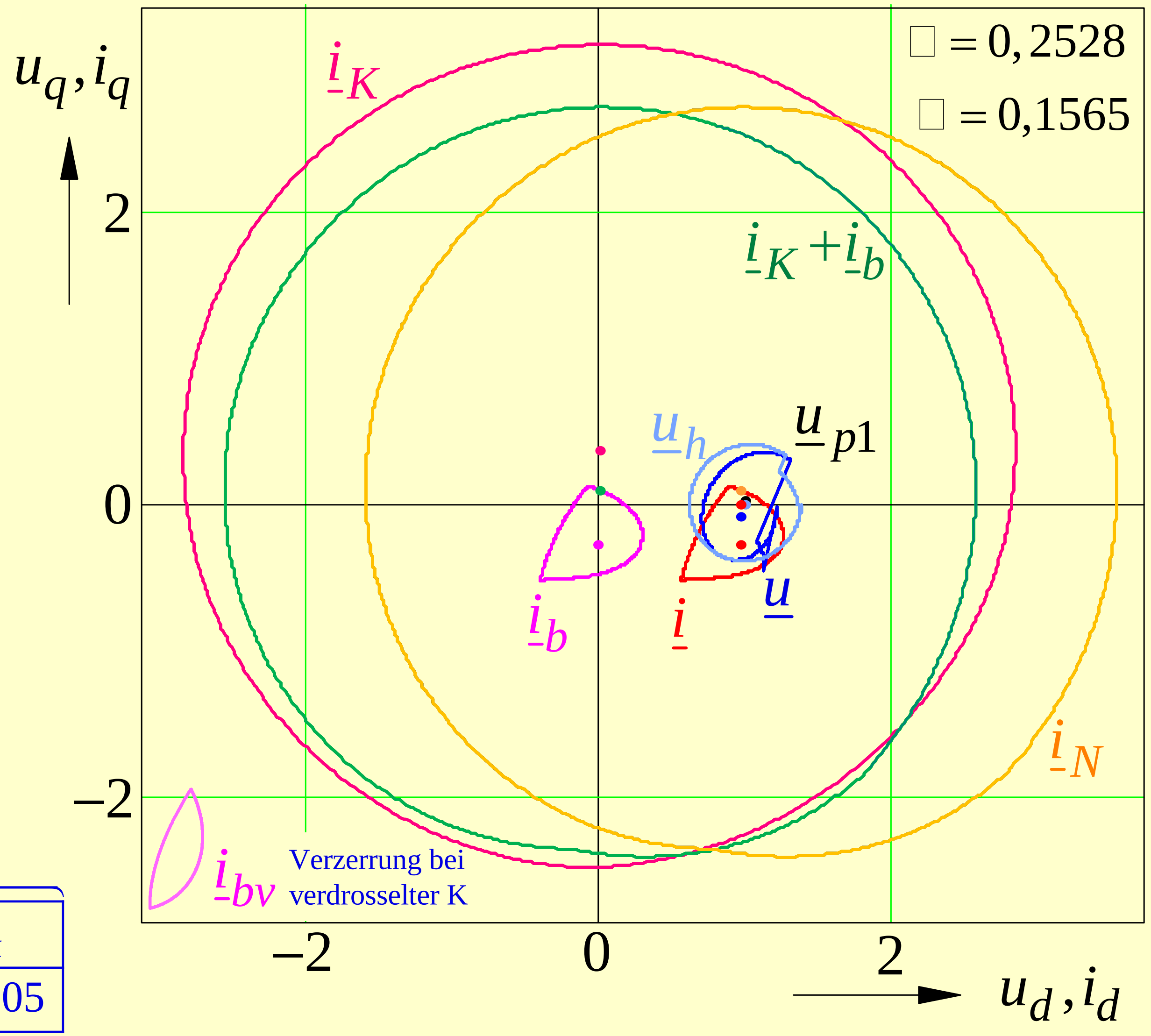
Systemeigenfrequenzen

n_l	n_{dk}	n_{de}	n_k
4,4494	4,4881	4,4960	4,5688



Resonanz des Stromrichtersystems

Der Reihenresonanzkreis ist so abgestimmt, daß die System-eigenfrequenzen im Mittel gleich einer harmonischen Frequenz sind



$$\overbrace{n_{0K} = \sqrt{33} = 5{,}7446}^{\text{Resonanzfrequenz des Kondensatorzweiges}}$$

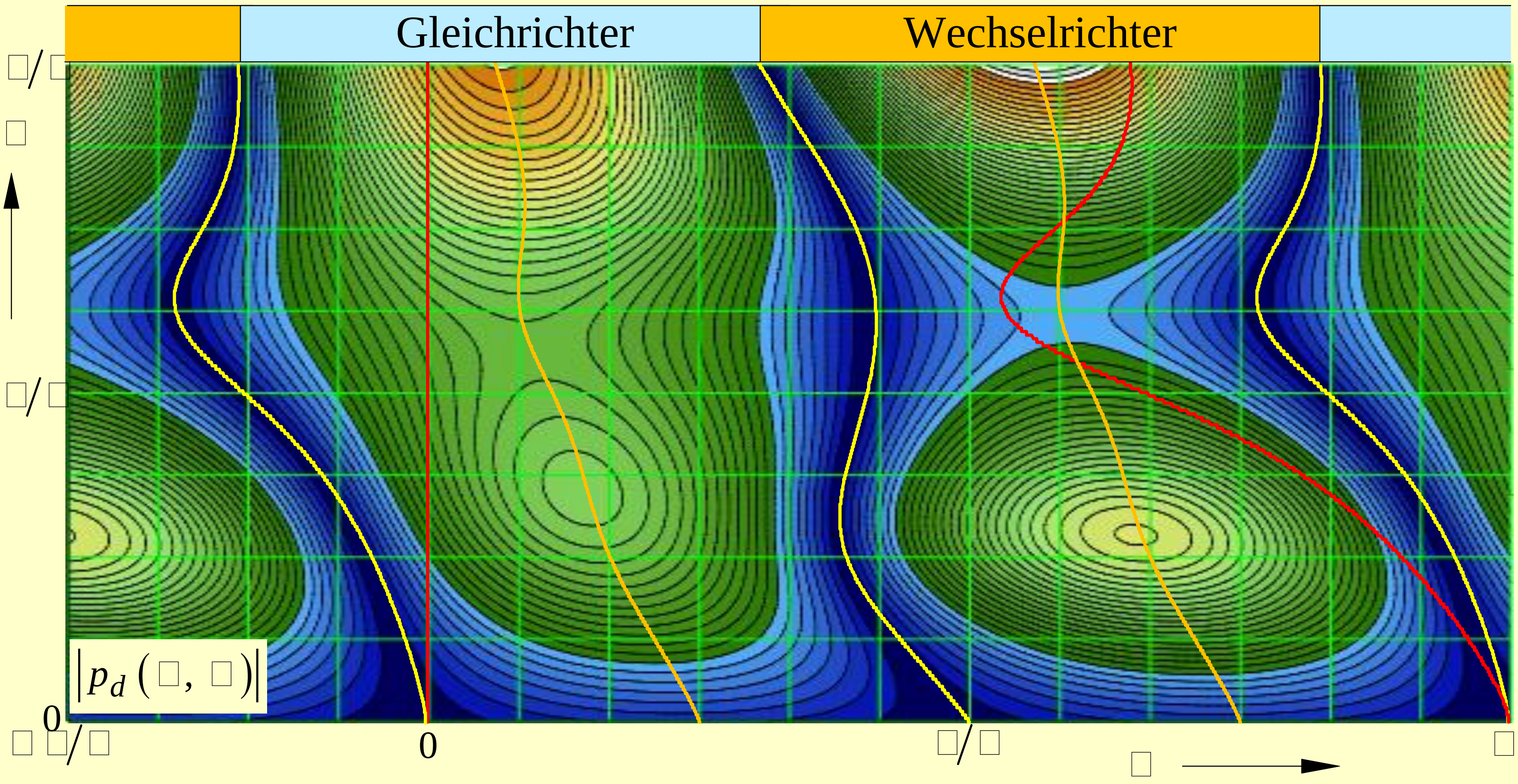
$$\Downarrow$$

Systemeigenfrequenzen

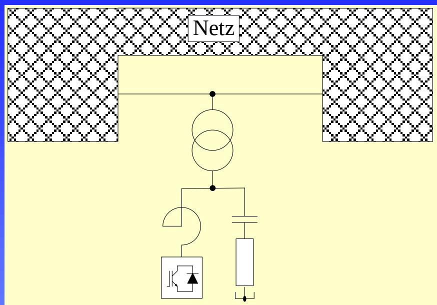
n_l	n_{dk}	n_{de}	n_k
4,9435	4,9973	5,0082	5,1105

Stromrichterleistung bei Resonanz

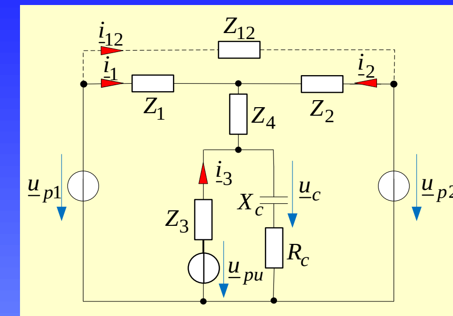
Da sich die Eigenfrequenzen der vier Ersatzstromkreise unterscheiden, gibt es keinen eindeutigen Resonanzpunkt und das Resonanzverhalten ist vom Steuer- und Kommutierungswinkel abhängig. Der Arbeitsbereich des Stromrichters mit seinen charakteristischen Linien ist verzerrt.

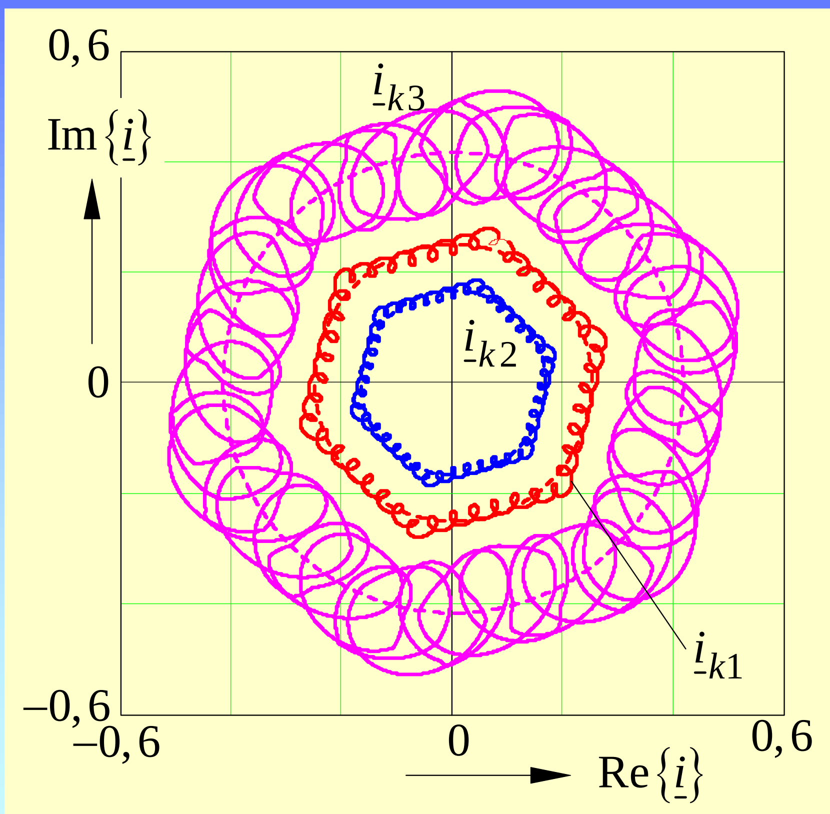


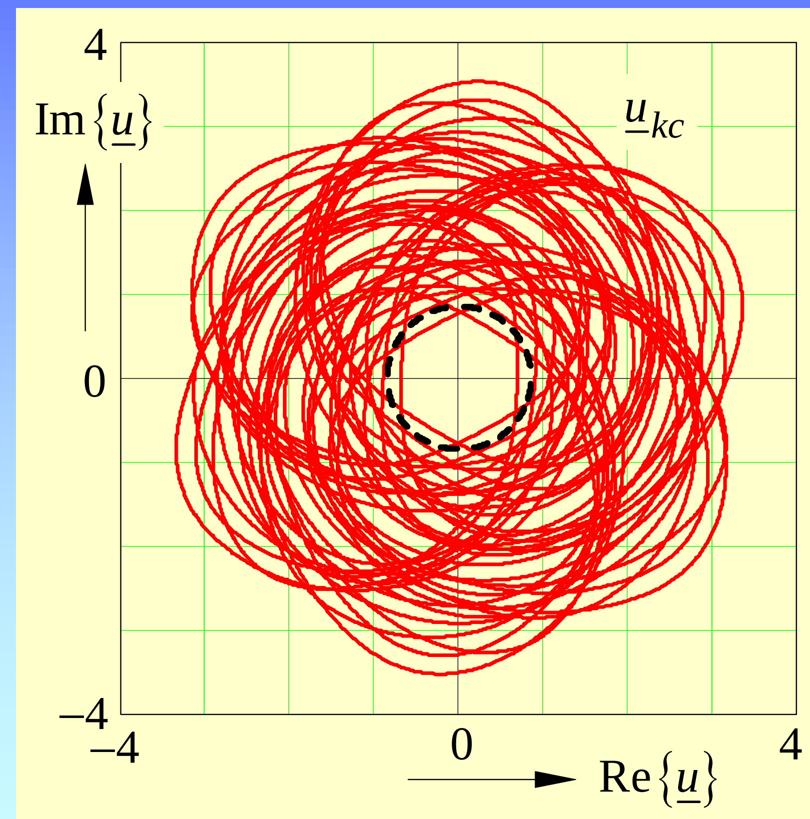
Spannungsumrichter am Drehstromnetz



Auch Stromrichtersysteme mit selbstgeführten Umrichtern können in Resonanz geraten. Trotz der höherfrequenten Verzerrung ist die sechspulsige Grundperiodizität deutlich erkennbar.







Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit