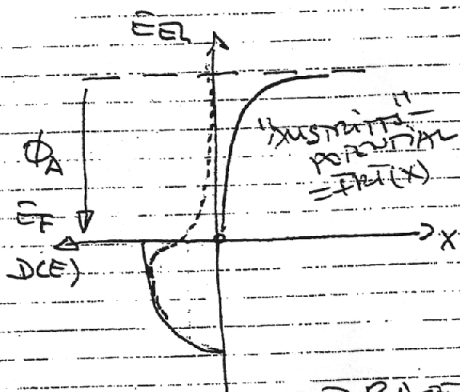


THERMISCHE ELEKTRONENEMISSION

 Φ_A AUSMITTLARBEIT DES METALLS

 $\rightarrow$ ANSATZ: QUADRIPLAS-ELEKTRONEN IM METALL

 $\rightarrow$ IMPULSVERTEILUNG p_x, p_y, p_z

ENTSPRECH. $E = E_{kin} = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}$
 $\Rightarrow$ RATE DER ELEKTRONEN/ZEIT DURCH FLÄCHE IN x -RICHTUNG, MIT RANDBED.

$$p_{x,min} = \sqrt{2m\Phi_A}$$

 $\rightarrow$ FERMIVERTeilUNG (ABHÄNGIG VON DER IMPULS)

$$f_F(p) = \frac{2V}{N\pi^3} \left[\exp\left(\frac{p^2}{2m\hbar^2} - \frac{E_0}{kT}\right) + 1 \right]^{-1}$$

$$d\Phi_p = dp_x dp_y dp_z \rightarrow f_F(p) d\Phi = \frac{2V}{N\pi^3} \left[\exp\left(\frac{p^2}{2m\hbar^2} - \frac{E_0}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} dp_x dp_y dp_z$$

 $\rightarrow$ ANTEIL EL. STROMDICHTE

$$dj_x^{(p)} = -e \frac{2N}{V} f_F(p) \cdot \frac{p_x}{m} \cdot dp_x dp_y dp_z$$

$$\Rightarrow j_x = -\frac{e \cdot N}{m \cdot V} \iiint p_x f_F(p) dp_x dp_y dp_z$$

MIT ZYL. SYMM.

$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2$$

$$d\Phi = p_y dp_y dp_z dp_x$$

$$\Rightarrow j_x = -\frac{eN}{m \cdot V} \cdot \frac{2V}{N\pi^3} \int_{p_{x,min}}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} p_y p_x \left[\exp\left(\frac{p_x^2}{2m\hbar^2} + \frac{p_y^2}{2m\hbar^2} - \frac{E_0}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} dp_x dp_y dp_z$$

MIT ABKÜRZUNGEN $E_x = \frac{p_x^2}{2m}, E_y = \frac{p_y^2}{2m}$

$$dE_x = \frac{1}{m} p_x dp_x, dE_y = \frac{1}{m} p_y dp_y$$

$$\Rightarrow j_x = \left(\frac{-e \cdot m^2 \cdot 2}{\hbar^3 m} \right) \int_{E_x=\Phi_A}^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \left[\exp\left(\frac{E_x}{kT} + \frac{E_y}{kT} - \frac{E_0}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} dE_x dE_y d\varphi$$

$$= \frac{2\pi \cdot 2em}{\hbar^3} \int_{E_x=\Phi_A}^{\infty} \int_0^{\infty} \left[\exp\left(\frac{E_x}{kT} + \frac{E_y}{kT} - \frac{E_0}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} dE_y dE_x$$

 Φ_A METALLE

	CS	Li	Cu	Al	Ni	Pt
$\left[\frac{\Phi_A}{eV} \right]$	1.8	2.4	4.7	5.1	5.2	5.65

$$j_x = \frac{1}{\hbar^3} (-4\pi e m k^2 T^2) \exp\left(-\frac{\Phi_A}{kT}\right)$$

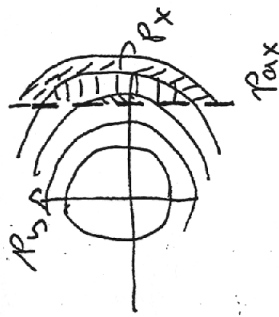
RICHARDSON-DUPREMAN-RELATION

$$j_{x,sättigung} = -AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_A}{kT}\right); A = 120 \frac{A}{cm^2 K^2}$$

3.4 MITTELWERT DER ENERGIE - WÄRMESTROMEN BEDARF ZUR EMISSION VON ELEKTRONEN

① AUSMITTLARBEIT $\phi_a = \frac{p_{ax}^2}{2m}$

② WEGEN DER TEMPERATURVERTEILUNG DER EL. IM FESTKÖRPER BRINGT "JEDER" ELEKTRON EINE "MITTELWERT" KINETISCHE ÜBERSETZUNGSENERGIE ($\bar{E}_{kin} - \phi_a$) AUS DEM FESTKÖRPER MIT.



INGESAMENDE MIT $p_x \geq p_{ax}$ ENTFAHLEN DIE ZAHLE DER EREIT. ELEKTRONEN (NENNEN) UND DIE ÜBERSETZUNGSENERGIE.

$$\bar{E}_{kin} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{p_{ax}}^{+\infty} E(p) \cdot f_F(p) dp_x dp_y dp_z}{\int_{p_{ax}}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_F(p) dp_x dp_y dp_z} - \phi_a$$

$$\bar{E}_{kin} = \frac{\frac{1}{2m} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dp_y dp_z \int_{p_{ax}}^{+\infty} p_x^3 + p_x^2 p_y^2 + p_x^2 p_z^2 \left[\exp\left(\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - 2m\phi_a}{2mkT}\right) + 1 \right]^{-1} dp_x}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dp_y dp_z \int_{p_{ax}}^{+\infty} p_x \left[\exp\left(\frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - 2m\phi_a}{2mkT}\right) + 1 \right]^{-1} dp_x} - \phi_a$$

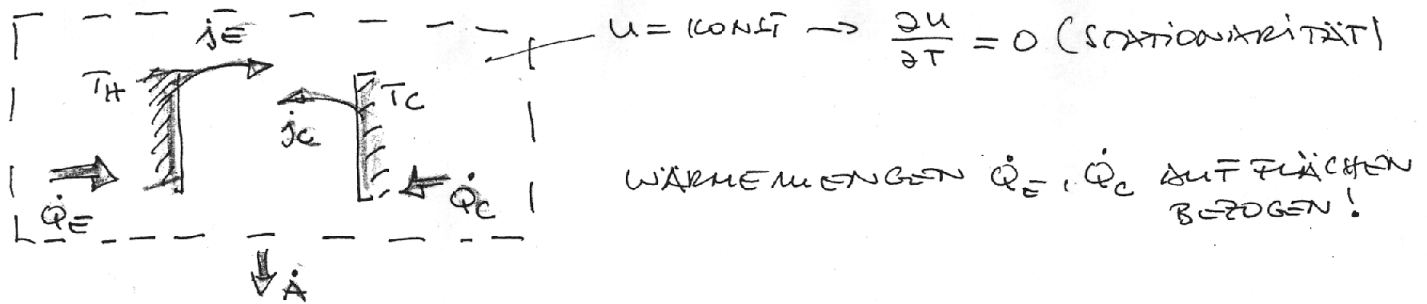
$$\bar{E}_{kin} = 2kT$$

GESAMTENERGIE BEDARF ZUR THERMISCHE ELEKTROGENEMISSION PRO ELEKTRON

$$\boxed{\phi_a + 2kT}$$

3.5 BILANZ DER WÄRMEFLÜSSE UND WIRKUNGSGRAD VON THERMIONISCHEN WÄNDLERN

3-6



$$\dot{Q}_E = j_E \left(\phi_E + \frac{2kT_E}{|e|} \right) - j_C \left(\phi_C + \frac{2kT_C}{|e|} \right)$$

$$\dot{Q}_C = j_C \left(\phi_C + \frac{2kT_C}{|e|} \right) - j_E \left(\phi_C + \frac{2kT_E}{|e|} \right)$$

1. HAUPTSATZ: $\oint Q = du + dA$ mit $du = 0$
 $\Rightarrow \oint Q = fA \leadsto \dot{Q}_E + \dot{Q}_C = \dot{A}_L$

ODER

$$\begin{aligned} \dot{A}_L &= j_E \left(\phi_E + \frac{2kT_E}{|e|} \right) - j_C \left(\phi_E + \frac{2kT_C}{|e|} \right) \\ &\quad - j_E \left(\phi_C + \frac{2kT_E}{|e|} \right) + j_C \left(\phi_C + \frac{2kT_C}{|e|} \right) \\ &= j_E \left(\phi_E - \phi_C + \frac{2kT_E}{|e|} - \frac{2kT_E}{|e|} \right) \\ &\quad - j_C \left(\phi_E - \phi_C + \frac{2kT_C}{|e|} - \frac{2kT_C}{|e|} \right) \end{aligned}$$

$$\boxed{\dot{A}_L = (j_E - j_C)(\phi_E - \phi_C)}$$

BEMERKUNGEN:

$$\dot{A}_L = 0 \text{ f\"ur } j_E = j_C$$

$$\text{b) f\"ur } \phi_E = \phi_C *$$

*) GILT NUR F\"UR RAUMLADUNGSGE-
TRENNTEN FALL $\downarrow$

2) ROHE APPROXIMATION:

mit $\frac{2kT_E}{|e|} \ll \phi_E$; $\frac{2kT_C}{|e|} \ll \phi_C$ UND $j_E \gg j_C$ FOLGT

$$\frac{j_E \phi_E}{T_E} - \frac{j_E \phi_C}{T_C} \leq 0 \leadsto \frac{\phi_E}{T_E} \leq \frac{\phi_C}{T_C} \text{ ODER } \boxed{\frac{\phi_E}{\phi_C} \leq \frac{T_E}{T_C}}$$

UND DAMIT

$$\eta = \frac{j_E(\phi_E - \phi_C) - j_C(\phi_E - \phi_C)}{j_E(\phi_E + \frac{2kT_E}{|e|}) - j_C(\dots)} \approx \frac{\phi_E - \phi_C}{\phi_E + \frac{2kT_E}{|e|}}$$

UND

$$\boxed{\eta_{\text{THEMION.}} = \frac{\phi_E - \phi_C}{\phi_E} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{2kT_E}{|e| \cdot \phi_E}} \right) = \eta_{\text{CARNOT}} \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{2kT_E}{|e| \cdot \phi_E}} \right]}$$

(3) WENIGER ROHE APPROXIMATION

3-7

ANSTELLE VON

$$\frac{\phi_E}{T_E} \leq \frac{\phi_C}{T_C}$$

NUN VIA CLAUSIUS-RELATION

UND $j_E \gg j_C$

$$\frac{j_E}{T_E} \cdot \left(\phi_E + \frac{2kT_E}{e} \right) - \frac{j_E}{T_C} \left(\phi_C + \frac{2kT_E}{e} \right) \leq 0$$

$$\rightarrow \frac{\phi_E}{T_E} + \frac{2kT_E}{e \cdot T_E} - \frac{\phi_C}{T_C} - \frac{2kT_E}{e \cdot T_C} \leq 0 \quad \text{UND}$$

$$\frac{\phi_E}{\phi_C} \leq \frac{T_E}{T_C} + \frac{2kT_E}{e \cdot \phi_C} \left(\frac{T_E}{T_C} - 1 \right) \quad \text{ODER}$$
$$\frac{\phi_E}{T_E} \leq \frac{\phi_C}{T_C} + \underbrace{\frac{2k}{e} \left(\frac{T_E}{T_C} - 1 \right)}_{=\varepsilon}$$

DAMIT WIRD DER WIRKUNGSGRAD

$$\eta = \underbrace{\left(\frac{T_E - T_C}{T_E} \right)}_{= \frac{T_H - T_C}{T_H}} \left(\frac{1}{1 + \underbrace{\left(\frac{2k}{e} \right) \cdot \frac{T_E}{\phi_E}}_{=\varepsilon}} \right)$$
$$= \eta_{\text{CARNOT}}$$

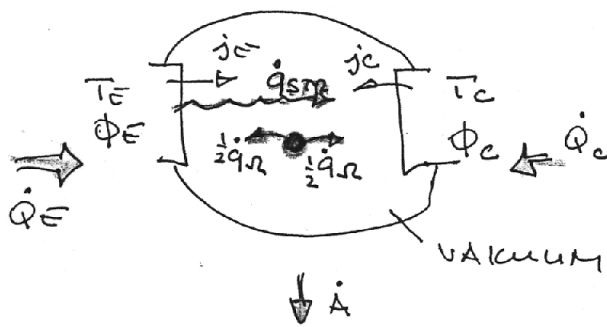
$$\rightarrow \eta = \left(\frac{T_E - T_C}{T_E} \right) \left(\frac{1}{1 + \underbrace{\frac{2k}{e} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \frac{T_C}{\phi_C}}_{\text{ETWAS KLONEN ALS BEI ROHER APPROXIMAT. IN } \alpha_1}} \right)$$

ETWAS KLONEN ALS BEI ROHER APPROXIMAT. IN α_1

$\rightarrow$ KENNEN KLONEN ALS IN α_1

$$\rightarrow \eta_{(3)} > \eta_{\alpha_1}$$

3.6 THERMIONISCHER GENERATOR MIT REALEN VERSTÜTTENEN 3-8



$\dot{q}_{str}$ STRahlung ($\sim T^4$)

$\dot{q}_R$ OHMSCHE HEIZUNG

MIT METTO-BILANZ

$$\dot{q}_{str.} = \sigma \cdot \epsilon \cdot T_E^4 - \sigma \cdot \epsilon \cdot T_C^4$$

$$\dot{q}_R = (j_E - j_C)^2 \cdot R \quad *)$$

(JENOWE FÜR HÄLFTE ÜBER EMITTER BZW. COLLECTOR MACHT MAN DEN ABGEGLEICH)

BILANZ DER WÄRMEMENGEN (AUF FLÄCHEN BEZOGEN)

$$\dot{Q}_E = j_E (\Phi_E + \frac{2kT_E}{e}) - j_C (\Phi_E + \frac{2kT_C}{e}) + \epsilon \sigma (T_E^4 - T_C^4) - \frac{1}{2} (j_E - j_C)^2 \cdot R$$

$$\dot{Q}_C = -j_E (\Phi_C - \frac{2kT_E}{e}) + j_C (\Phi_C + \frac{2kT_C}{e}) - \epsilon \sigma (T_E^4 - T_C^4) - \frac{1}{2} (j_E - j_C)^2 \cdot R$$

UND DARAUS:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_E + \dot{Q}_C}{\dot{Q}_E} = \frac{(j_E - j_C)(\Phi_E - \Phi_C) - (j_E - j_C)^2 \cdot R}{j_E (\Phi_E + \frac{2kT_E}{e}) - j_C (\Phi_E + \frac{2kT_C}{e}) + \epsilon \sigma (T_E^4 - T_C^4) - \frac{1}{2} (j_E - j_C)^2 \cdot R}$$

FÜR WEITERE BETRACHTUNG NUN EINE REALISTISCHE NÄHERUNG $j_C \approx 0!$

DAMIT WIRD

$$\eta = \frac{j_E (\Phi_E - \Phi_C) - j_E^2 \cdot R}{j_E (\Phi_E + \frac{2kT_E}{e}) + \epsilon \sigma (T_E^4 - T_C^4) - \frac{1}{2} j_E^2 \cdot R}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{(\Phi_E - \Phi_C) - j_E \cdot R}{(\Phi_E + \frac{2kT_E}{e}) + \frac{\epsilon \sigma}{j_E} (T_E^4 - T_C^4) - \frac{1}{2} j_E \cdot R}$$

*) MIT $j^2 \cdot R = (\frac{I}{A})^2 \cdot R \rightarrow R$ IN EINHEITEN $\Omega \text{ cm}^2$
 R FLÄCHE

OPTIMIERUNG DES WIRKUNGS GRADES

① ϕ_c MÖGLICHEST KLEIN (MATERIALEIGENSCHAFT!)
 (Δ FÜR $\phi_c \rightarrow 0$ (WÜRDEN AUF EL. DEN FEST-
 KÖRPER VERLASEN KÖNNEN)

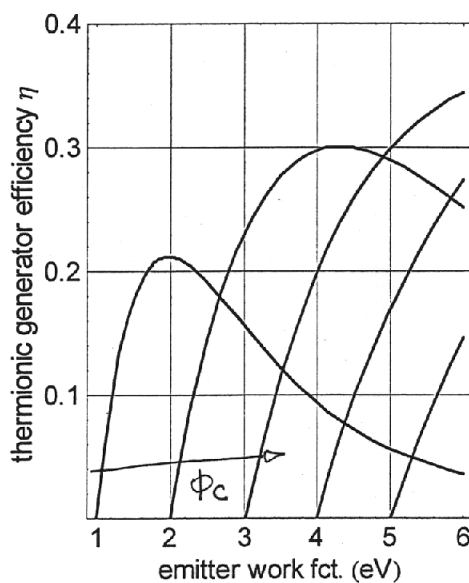
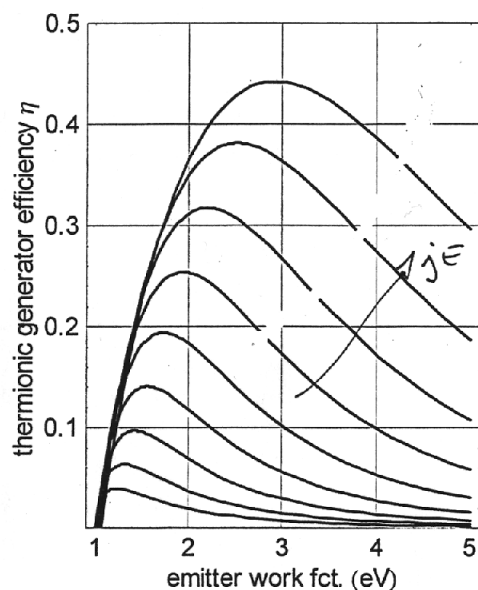
② ϕ_E OPTIMIEREN MIT $T_E \rightarrow j_E$ ETC

③ j_E MÖGLICHEST GROSS, DAMIT EINFLUSS VON
 STRAHLUNG $((T_E^4 - T_C^4) \cdot \frac{1}{j_E})$ KLEIN WIRD

ABER! RAUHLADUNGSEFFEKTE

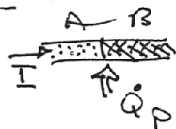
→ VGL. SPÄTER!

(VIA POISSON GLEICH. WIRD)
 POT. - DIFF. FÜR UNIPOLARE
 TRÄGERSTROMUNG NOTWENDIG)



$\phi_c = 1.2 \text{ V}$
 (T_E SO, DASS j_E
 BEI ENTSPRECH.
 ϕ_E EINGETRAGEN
 WERDEN KANN)

$j_E = \text{KONST} (10 \text{ A/cm}^2)$

ZUSATZBEMERKUNG3.6 VERGLEICH THERMOELEKTRISCHER GENERATOR
VS. THERMIONISCHER GENERATORTHERMOELEKTRIKPELTIER-EFFEKT:

$$\dot{Q}_P = I \cdot \pi_{AB}; \pi = \kappa \cdot T$$

$$\hookrightarrow \kappa = \frac{\pi}{T} = \frac{\dot{Q}}{I} \cdot \frac{1}{T}$$

WÄRMETRANSPORT

$$\dot{Q}_{WL} = J \cdot \Delta T$$

THERMIONIKRICHARDSON-EFFEKT

$$\dot{Q}_E = I \left(\phi_E + \frac{2kT}{e} \right)$$

$$\alpha^* = \frac{\dot{Q}_E}{T_E} \cdot \frac{1}{I} = \frac{\phi_E}{T_E} + \frac{2k}{e}$$

$$\dot{Q}_{\text{transp.}} = \left(\frac{I}{A} \right) \left[\frac{2k(T + \Delta T)}{e} - \frac{2kT}{e} \right]$$

$$+ G \cdot E \cdot 4T^3 \cdot \Delta T$$

$$\dot{Q}_{\text{transp.}} = J^* \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\text{mit } J^* = \left[\frac{2k\Delta T}{e} \cdot j + 4\epsilon_0 \cdot T^3 \right] \cdot \Delta x$$

EL. LEITFÄHIGKEIT

$$j = G \cdot E_x$$

IM BEREICH "ANLAUFKONN-
LINIE"

$$\Delta \varphi = U = \frac{kT}{e}$$

$$\rightarrow \frac{\Delta U}{\Delta x} = E_x \quad (\text{EL. FELDST.})$$

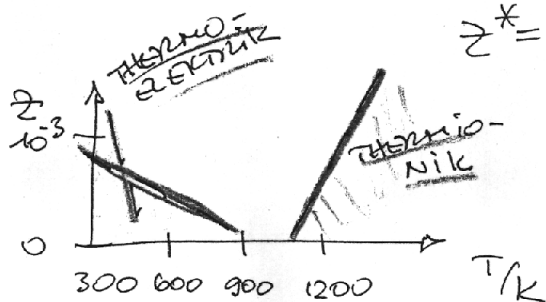
$$\text{mit } j = G^* \cdot E_x \text{ WIRD}$$

$$G^* = \frac{j \cdot \Delta x \cdot e}{kT}$$

$\Rightarrow$ EFFEKTIVITÄT (FIGURE OF MERIT)

$$Z = \frac{\alpha^2}{J \cdot r}$$

$\Rightarrow$

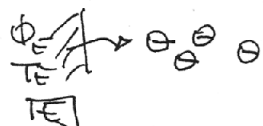


$$Z^* = \frac{(\alpha^*)^2}{J^* \cdot \frac{1}{G^*}}$$

3.7 RAUMLADUNGSEFFEKTE

a) PHÄNOMENOLOGISCHES

ELEKTRONEN EMITTIERT (THERMISCH AUS Z.B. EMITTER)



TRAGEN ZUR RAUMLADUNG BIS $\rho(x)$

→ IHR TRANSPORT (STATIONÄR)

$$\rightarrow j = \text{const} = e \cdot n \cdot v$$

MIT $n = n(x)$ UND $v = v(x)$

POISSONGLEICHUNG (1-DIM.) MIT POTENTIAL $\varphi(x)$

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = - \frac{\rho(x)}{\epsilon \epsilon_0} = - \frac{n(x) \cdot e}{\epsilon \epsilon_0} = - \frac{(j) \cdot e}{\epsilon \epsilon_0 v(x) \cdot e} \quad n(x) = \frac{j}{e \cdot v(x)}$$

UND MIT BALLISTISCHEM TRANSPORT $\frac{1}{2} m v^2 = e \cdot \varphi$, ALSO

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot \varphi(x)}$$

FOLGT

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = \frac{(-j)}{\epsilon \epsilon_0} \cdot \sqrt{\frac{m}{2e}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varphi}} \quad ; \quad \text{VAKUUM} \rightarrow \epsilon = 1$$

$$\text{ODER} \quad \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} \cdot \sqrt{\varphi(x)} = \underbrace{\frac{(-j)}{\epsilon_0} \frac{1}{\sqrt{\frac{2e}{m}}}}_{\beta} = \text{const.}$$

$\varphi'' \cdot \sqrt{\varphi} = \beta \rightarrow$ MIT ANSATZ ZUR LÖSUNG

$\varphi = a \cdot x^s$ WIRD

$$a^{\frac{1}{2}} \cdot x^{\frac{s}{2}} (s-1) \cdot s \cdot a \cdot x^{s-2} = \text{const} = \beta$$

$$\rightarrow x^{s-2+\frac{s}{2}} = \text{const} = \beta^* = x^0 \rightarrow s-2+\frac{1}{2}s=0$$

$$\text{ODER } s = \frac{4}{3}$$

UND WEITERN

$$a \cdot a^{\frac{1}{2}} \cdot \underbrace{x \cdot x}_{=1}^{s-2} (s-1) \cdot s = \beta$$

ODER

$$a = \dots = \left[\frac{9}{4} \cdot \frac{1}{\epsilon_0} \frac{(-j)}{\sqrt{\frac{2e}{m}}} \right]^{\frac{2}{3}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\varphi(x) = \left[\frac{9}{4} \cdot \frac{1}{\epsilon_0} \frac{(-j)}{\sqrt{\frac{2e}{m}}} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot x^{\frac{4}{3}}}$$

MIT RANDBEDINGUNGEN

$\varphi(x=0) = 0$ UND $\varphi(x=d) = V_{CE}$ (KOLLEKTOR-
EMITTER-
POTENTIAL-
DIFFERENZ)

WIRD

$$V_{CE} = \left[\frac{q}{4} \cdot \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{(-j)}{\sqrt{\mu}} \right]^{2/3} \cdot d^{4/3}$$

UND DIT MIT

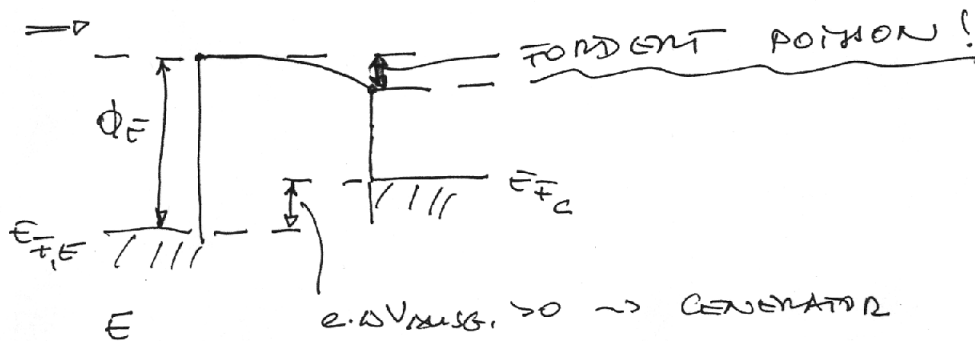
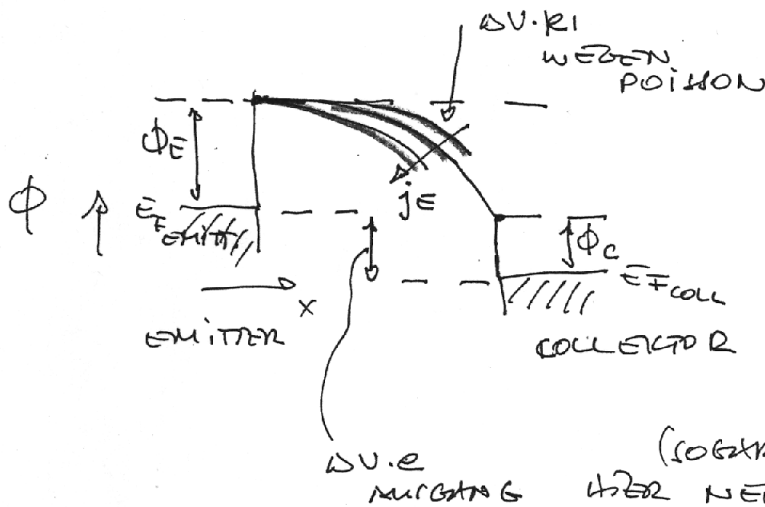
$$\left[\frac{(-j)}{\sqrt{\mu}} \right] = \frac{4}{g} \cdot \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{\mu}} \cdot \frac{1}{d^2} \cdot V_{CE}^{3/2}$$

ELEKTRODEN!

STROMDICHTE - SPANNUNGS-
RELATION FÜR
VAKUUMDIODE

⇒ D.H. FÜR VORGEGEBENE STROMDICHTE UND
GEGEB. ABSTAND → ZUM TRANSPORT
(UNIPOLAR!)

→ ΔV NOTWENDIG!



↑ ZAHLENBEISPIEL: WIE "SPENDIEREN" $\Delta V_{CE, \text{poisson}} = 0.1 \text{ VOLT}$

$$\Rightarrow d^2 = \frac{4}{g} \cdot \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{\mu}} \cdot \frac{(0.1 \text{ V})^{3/2}}{10 \text{ A/cm}^2}$$

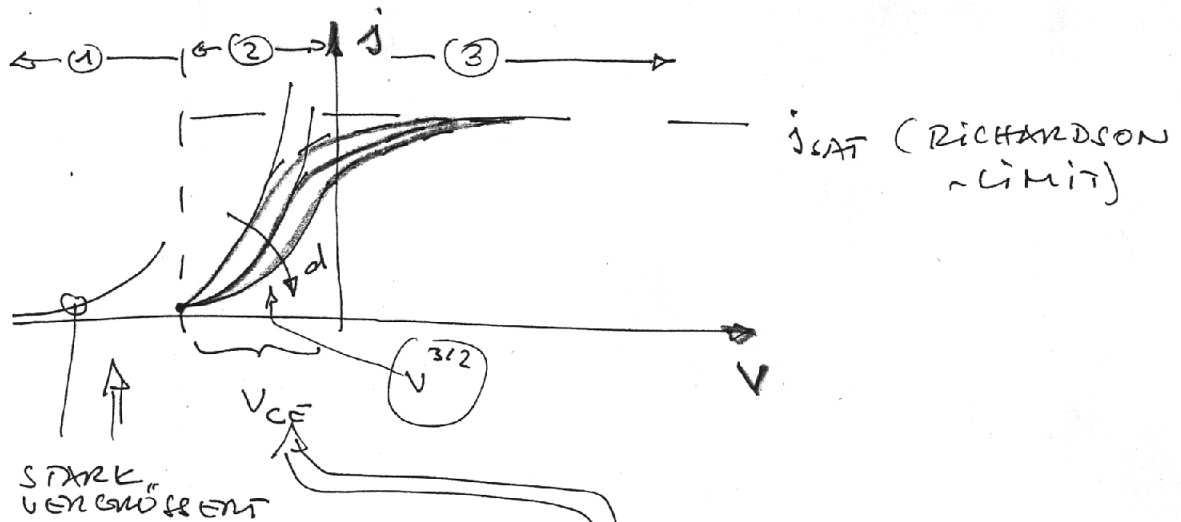
$$d^2 = 2.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \Rightarrow \boxed{d \approx 1.5 \times 10^{-4} \text{ cm} = 1.5 \mu\text{m} !}$$

KOLLIDIERT Z.B. MIT THERMISCHER
AUDEHNUNG

1500K DES GEOM. DEGENS
DER GENERATOREN
300K →

3.7 STROM-SPANNUNGSKENNLINIEN FÜR VON THERMISCHEN DIODEN

3-13.



exp - ANSTIEG
WEGEN ENERGIE-
VERTEIL. D. EL.
(FERMI IM FEST-
KÖRPER;
FERMI-ÄHNLICH
NACH THERM.
EMISSION)

②
"RAUMLADUNG-
REGIME"

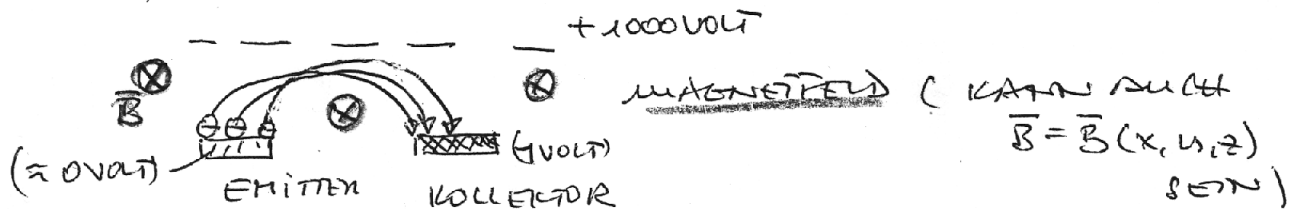
③
SÄTTIGUNGS-
REGIME
⇒ RAUMLADUNG
BEWIRKT
ERHÖHUNG
DER
AUSMITTS-
ARBEIT
 $\phi_E \rightarrow \phi_E^*$

① - "ANLAUF-
REGIME"

3.8 METHODEN ZUR VERRINGERUNG DER RAUHLADUNGSEINWÜLKE

VERMEIDUNG DES KONZEPTES "SPALTDIODEN"
(ELEKTRODENABSTÄNDE VON WENIGEN μm)

~ P_a MAGNETISCHE MODE



ABER: el.-el.-WECHSELWIRKUNG (COULOMB)

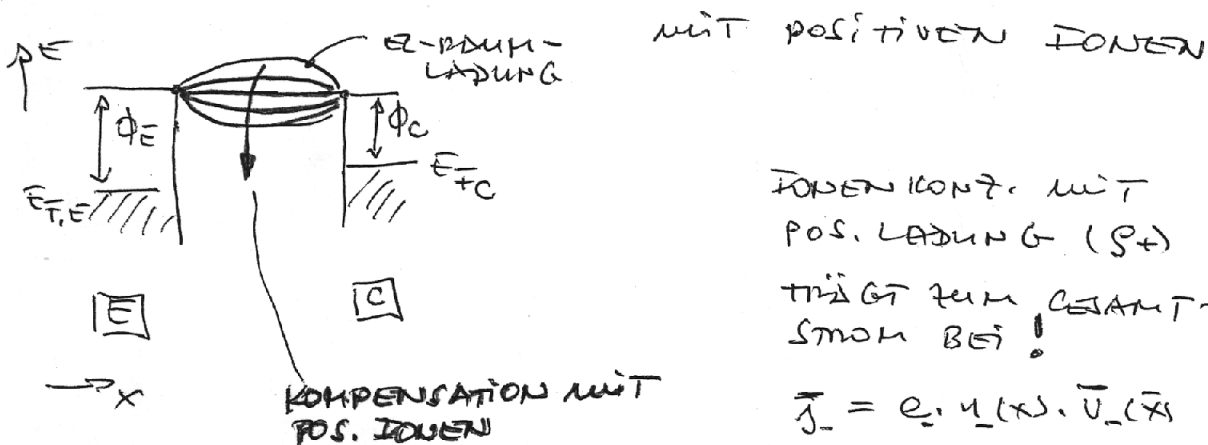
& ÜBERLAPZ.-PUNKTE

& ENERGIEVERL. BEI EMITTION
($\rightarrow$ GESCHWIND. VERL. !)

$\Rightarrow$ KÖNNE "PUNKTISTISCH" EINSTELLBARER
TRÄGERKOMPLEX

$\rightarrow$ EL. AUCH ZU +1000 VOLT-STROM!
 $\Rightarrow$ VERLUSTE ($>$ ALJ GEWINN!)

b) KOMPENSATION DER RAUHLADUNG



IONENKONT. MIT
POS. LADUNG ($S+$)
TRÄGT ZUM GESAMT-
STROM BEI!

$$\vec{J}_- = e_- \cdot n_-(x) \cdot \vec{v}_-(x)$$

$$\vec{J}_+ = e_+ \cdot n_+(x) \cdot \vec{v}_+(x)$$

FÜR VOLLSTÄNDIGE KOMPENSATION

$n_-(x) = n_+(x)$ UND BEWEGLICHKEIT-
VERHÄLTNISSE

$$\Rightarrow \frac{j_+}{j_-} \sim \frac{\mu_+}{\mu_-}$$

$\mu_- \gg \mu_+$
 $\rightarrow j_+$ KLEIN HEBT j_- KLEIN $\rightarrow$ EUTL. GROßE HÄUFE VON IONEN!

→ FORDERUNG FÜR pos. RAUHLADUNG

→ LEICHTE IONISIERBARKEIT DER ZUSÄTZLICHEN ATOME! → IONISIERUNGSENERGIE

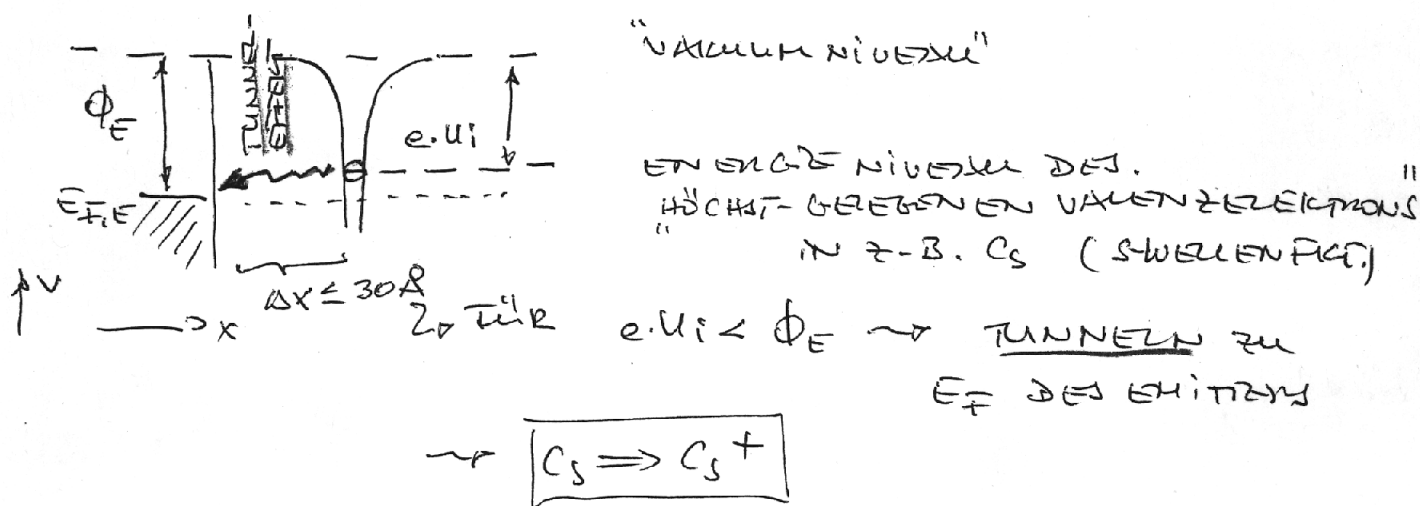
KRITERIEN BELEUCHTIGKEIT/MASS UND IONISIERUNGS-ENERGIE $\Rightarrow$ Cs-ATOME

→ Cs^+ AUS OBERFLÄCHEN-IONISIERUNGS-EFFEKTEN

$\Rightarrow$ 3.9 SYSTEM WOLFRAM - CÄSIUM

(OBERFLÄCHENEFFEKTE ZUR IONISIERUNG + KOMPENSATION DER ELEKTRO-
NEN-RAUHLADUNG)

a) IONISIERUNG AN OBERFLÄCHE



FÜR EMITTERTEMP. T_E EX. WAHRSCHEINLICH-
KEIT ZUR "DESORPTION" VON Cs^+ -IONEN IN
DIE GASPHASE → THERMISCH AKTIVIERTE RATE
FÜR STATIONARITÄT

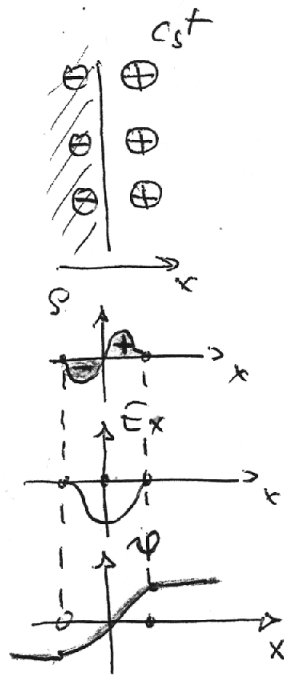
$$\rightarrow \Gamma_{\text{ADSORPT.}} = \Gamma_{\text{DESORPTION}}$$

$$\Gamma_{\text{ADSORPT.}} = \Gamma_{\text{ADSORPT.}}(n_{Cs, \text{GASPHASE}}, \dots)$$

$$\Gamma_{\text{DESORPT.}} = \Gamma_{\text{DESORPT.}}(\text{BEDECKUNG} = \text{KONZENTRAT. AUF OBERFLÄCHE, TOBENFLÄCHE, ...})$$

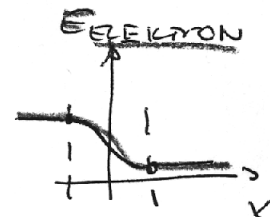
b) ZUSÄTZLICHER EFFEKT, AUS BEDECKUNG DER OBERFLÄCHE MIT POS. IONEN

$\Rightarrow$ DIPOL MOMENT $\rightarrow$ MODIFIKATION DER AUSMITT-ARBEIT ϕ_E

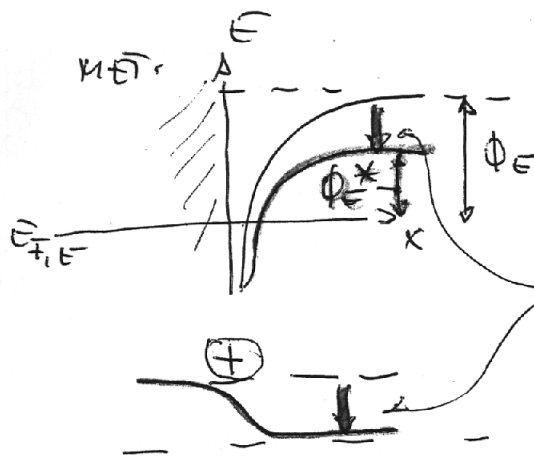


RAUHLADUNG (FLÄCHENHAFT)

$-1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$
 $\downarrow$
 $e \cdot \varphi = E_{\text{ELEKTRON}}$



WIRD SUPERPONIERT
 ZU UNGESTÖRTER
 AUSMITT ARBEIT
 (Z.B. VIA BILDKRAFT-
 ANSATZ)



ABSENKUNG D.
 AUSMITT ARBEIT VON $\phi_E \rightarrow \phi_E^*$
 DURCH BEDECKUNG
 DER OBERFLÄCHE MIT
 POS. IONEN

c) GENERATOR-KONZEPT WOLFRAM-CÄSIUM

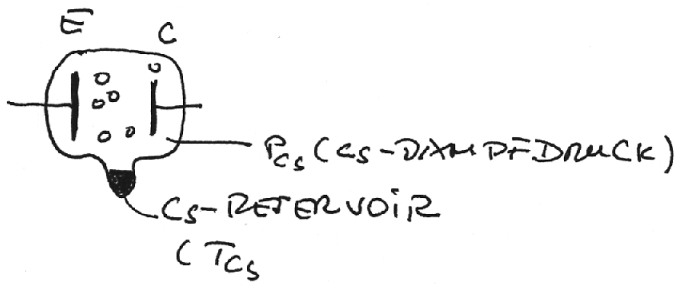
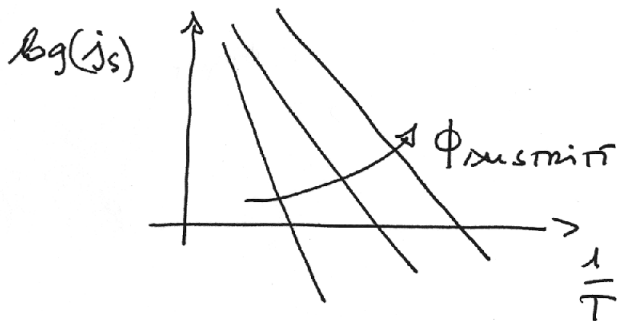


DIAGRAMM STROMDICHTE (THERM. EMISSION) ÜBER INVERSE TEMPERATUR



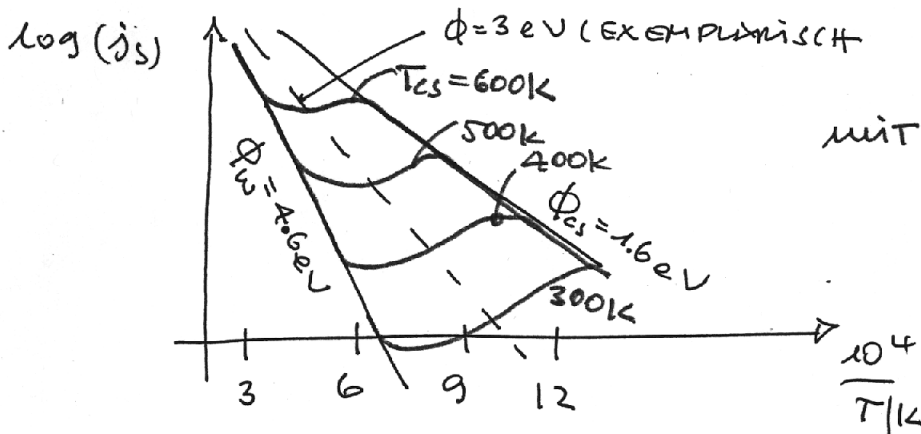
MIT RICHARDSON-GLICHUNG

$$j_s \sim T^2 \cdot \exp\left(-\frac{\phi_{ausm.}}{kT}\right)$$

$$\Rightarrow \ln(j_s) \sim \left(-\frac{1}{kT}\right) \cdot \phi_{ausm.}$$

(VERNACHLÄSS. TERM MIT T^2)

→ $j = j\left(\frac{1}{T}\right)$ FÜR EMITTER UND KOLLEKTOR



MIT C_s DAMPFD RUCK / RESERVOIR-TEMP.
→ BEDECKUNG VON E UND C
(LANGMUIRSCHES S-KURVEN)

→ BETRIEB VON EMITTER-KOLLEKTOR-KONFIGURATION

a) HOHER C_s -DRUCK (TEMP. T_{cs})

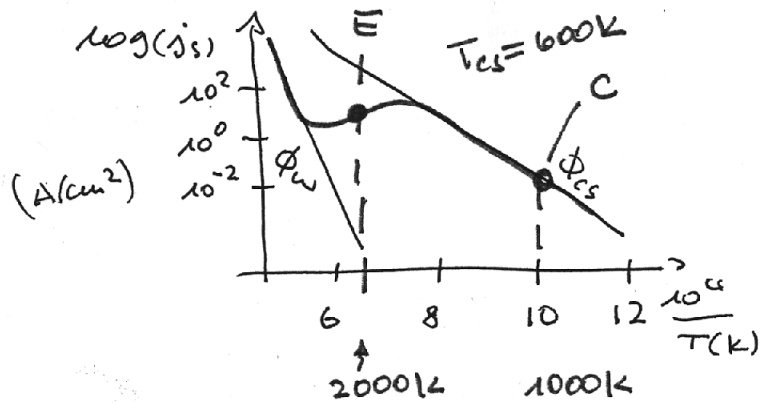
↳ HOCHDRUCK-KONVERTER

b) NIEDRIGER C_s -DAMPFDRUCK (TEMP. T_{cs})

↳ NIEDERDRUCK-KONVERTER

zu 2) HOCHDRUCK-KONVERTER

3-18



$$j_E \uparrow; j_C \hat{=} (0.1 j_E)$$

$$\phi_E = 3.2 \text{ eV}; \phi_C = 1.67 \text{ eV}$$

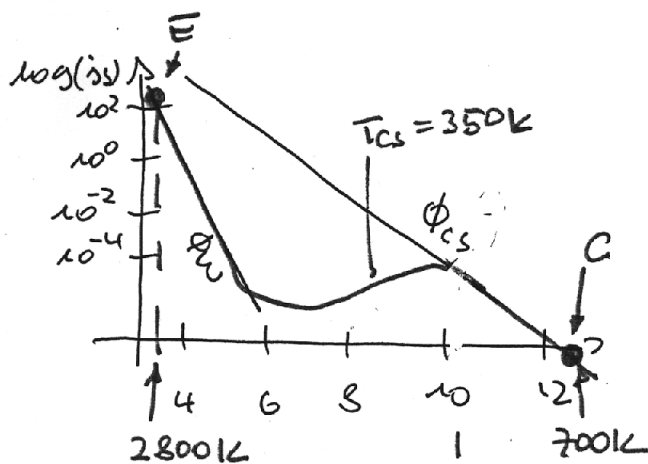
$$T_E = 2000K; T_C = 1000K$$

$$P_{CS} = 1 \text{ mbar}$$

$$\frac{P_{EL}}{A} = 10 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

$$\eta \leq 15\%; d_{EC} \approx 1 \text{ mm}$$

zu 3) NIEDRUCK-KONVERTER



$$j_E \uparrow; j_C \ll j_E$$

$$\phi_E = 4.6 \text{ eV}; \phi_C = 1.7 \text{ eV}$$

$$T_E = 2800K; T_C = 700K$$

$$P_{CS} = 10^{-3} \text{ mbar}$$

$$\frac{P_{EL}}{A} \approx \frac{1 \text{ W}}{\text{cm}^2}; \eta \leq 10\%$$

3.10 EDELGASKONVERTER

3-19

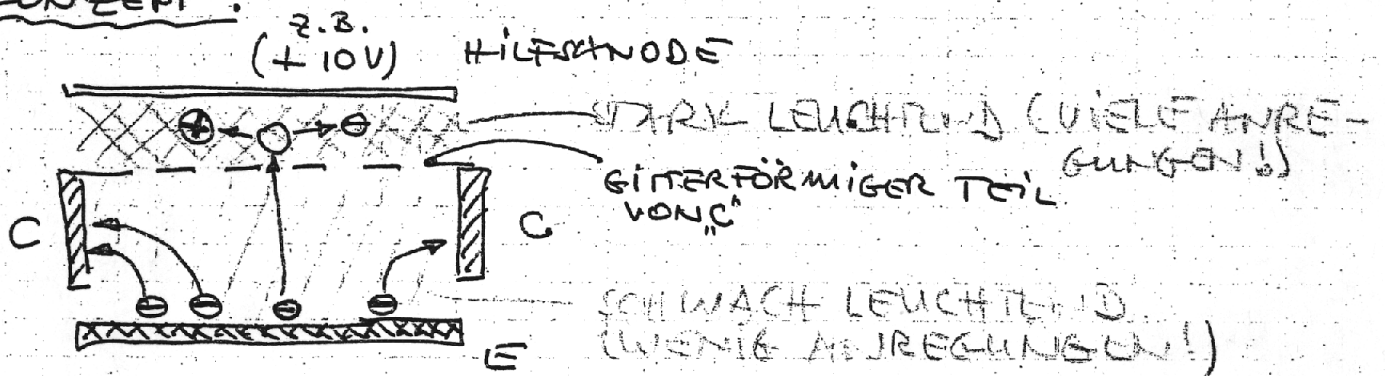
KOLLEKTORAUSTRITTSARBEIT $\Phi_c \approx 1.7 \text{ eV}$ MIT C_1 IST DAS MINIMALWERT

→ IM HOCHVAKUUM ODER MIT EDELGASEN
 $\Phi_K = 1 \text{ eV}$ REALISIERBAR

RAUHLADUNGSKOMPENSATION MIT EDERGASEN
($p \approx 0.1 \text{ TORR}$)

DA Φ_c RELAT. KLEIN → Φ_E AUCH KLEINER ALS SONST!
→ T_E, T_c NIEDRIGER

KONZEPT:



IONISIERUNG MIT HILFE:

- SELBSTÄNDIGER ENTLADUNG (NIEDERVOLTBÖGEN)
- UNSELBST. ENTLADUNG MIT RADIOAKT. MATERIALIEN
- HILFSANORDNUNG (3. ELEKTRODE, VOL. BILD!)

3.11 HEIß PIPES ZUR EFFIZIENTEN ÜBERTRAGUNG / TRANSPORT VON WÄRME

a) TRANSPORT VON WÄRME VIA WÄRMELEITUNG

→ WÄRMELEITWERT $K = \frac{\kappa \cdot A}{L}$ ← QUERSCHNITTFLÄCHE
LÄNGE
↑
WÄRMELEITFÄHIGKEIT

(METALLE (Al, Cu, Ag))

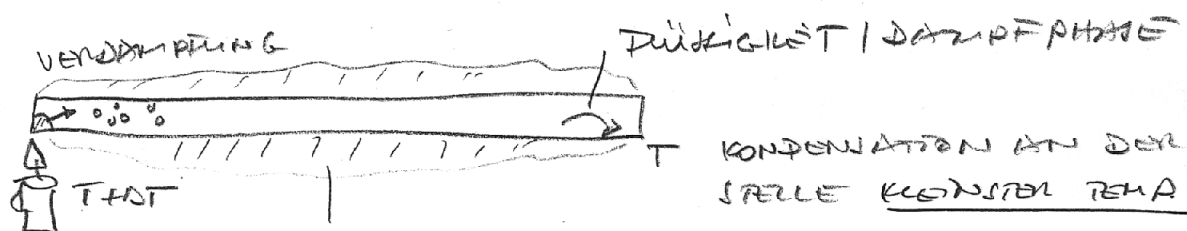
$$\kappa \approx (300-500) \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

→ ΔT SPENDIERTEN FÜR TRANSPORT

$\Delta T \sim L$!! JE WEITER WEG, UM SO GRÖßER ΔT ZU WÄRTEN!

b) TRANSPORT MIT DIFFUSION + PHASENÜBERGANG

ΔT ABER NUR ZUM "DURCHLAUFEN" DES PHASENÜBERGANGS! UNABHÄNGIG DAVON, WO ER STATTFINDET



IDEE (BESTMÖGLICHE
THERM. ISOLIERUNG

→ NACH EINSCHWINGZEIT
HELVICH ÜBERALL T_{SAT} ,
NUR AN DER ENTPAHME STELLE

→ ÜBERTRAGUNG VON KONDENSATIONS-/
VERDAMPF.-WÄRME

BEI (T) PHASENÜBERGANGS-
TEMPERATUR

(WÄHLBAR MIT ENTSPRECH. ↑
CHEM. KOMPONENTEN)

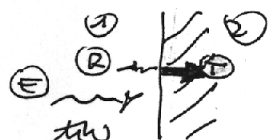
4 SOLARTHERMISCHE KONVERSION

4-1

4.1 PRINZIPIEN

ABSORPTION DER SOLARSTRahlung IM MÖGLICHST
GROSSEN PHOTONENENERGIEBEREICH (IR, VIS, UV...),
FÜR THERM. KOLLEKTOREN OHNE SPEKTRAL-SELEKTIVE
STRATEGIEN → "BANDABSTAND" DER ABSORBER $E_g = 0$ eV!
→ METALLISCHE / METALL-ÄHNLICHE FESTKÖRPER

→ FORMALE BESCHREIBUNG MIT WERKZEUGUNG VON
EL.-MAGNET. WELLEN (PHOTONEN) MIT MATERIE (FESTKÖRPERN)
⇒ MAXWELLGLEICHUNGEN Z.B. EBENE WELLE MIT
SENKRECHTEM EINFALL AUF DIE PHASENGRENZE ①
LUFT/VAKUUM — FESTKÖRPER ②



PROBLEM: MÖGLICHST HOHER ANTEIL $\textcircled{T}$
AN EINGECOPPELTER LEISTUNG (AMPLITUDEN-
QUADRAT $\times$ WELLENVEKTOR) IN ②
UND MÖGLICHST OPT. GRENZENWERT
(THRESHOLD, "BANDABSTAND" $E_g \rightarrow 0$)

AMPLITUDEN TRANSMISSIONSKOEFFIZIENT AN DER
PHASENGRENZE (Z.B. SENKRECHTEN EINFALL)

$$t_{12} = \frac{2 \tilde{n}_1}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2} \quad \tilde{n}_1, \tilde{n}_2 \text{ IMAGINÄR. KOMPLEX}$$

MIT SPEZIELLEM FALL n_1 FÜR LUFT/VAKUUM $n_1 = 1$

→ EINGECOPPELTE STRAHMUNGSLEISTUNG (Φ_0 ANKOMMEND)



$$\text{MIT } \Phi_E = |t_{12}|^2 \cdot \tilde{n}_2 = |t_{12}|^2 \cdot n_2$$

$$n_1 = 1$$

$$n_2 = \alpha + i\beta \quad \left. \vphantom{n_2} \right\} \rightarrow \Phi_E = \Phi_0 \cdot \left| \frac{2}{1 + \alpha + i\beta} \right|^2 \cdot |\alpha + i\beta|$$

$$\boxed{\Phi_E = \Phi_0 \left(\frac{2}{(1+\alpha)^2 + \beta^2} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \right)}$$

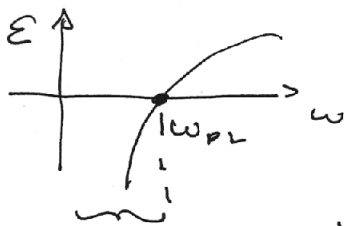
→ OPTIMIERUNG NACH α, β HYPOTHETISCHEN BRECHUNGS-
INDEX UND AMPLITUDENDÄMPFUNGSKOEFF. ($2\beta = \text{ABSORPT.}$
KOEFF.)

$\alpha \rightarrow 1$; $\beta \gg 1$! OBER KRAMERS-
KRONIG RELATION
VERKNÜPFT α MIT β

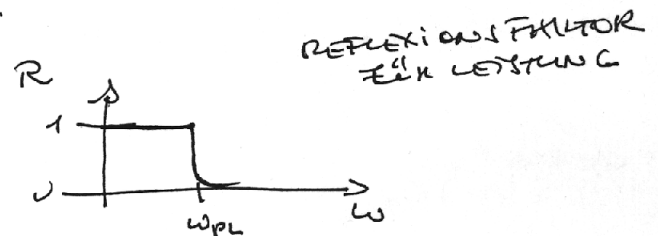
$$\text{Zudem } \alpha = \alpha(\omega) !$$

$$\beta = \beta(\omega) !$$

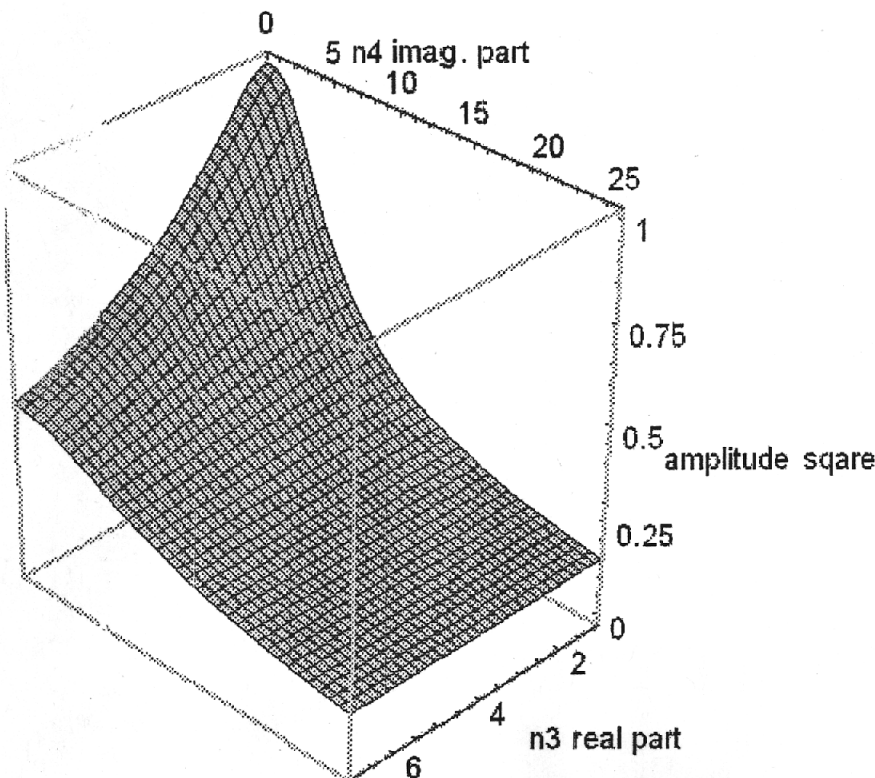
Z.B. METALLE WEGEN ABSORPTION ZUR "BLAU"
PHOTONENENERGIEN!



$\epsilon < 0$! → KEINE PROPAGATION VON
PHOTONEN



→ ANKOMM. PHOTONEN
WERDEN REFLEKTIERT
(SPIEGEL!)



4.2 PHOTONENMASCHINE / LIMIT FÜR SOLARTHERMISCHE (MUESER-MASCHINE) WANDLUNG

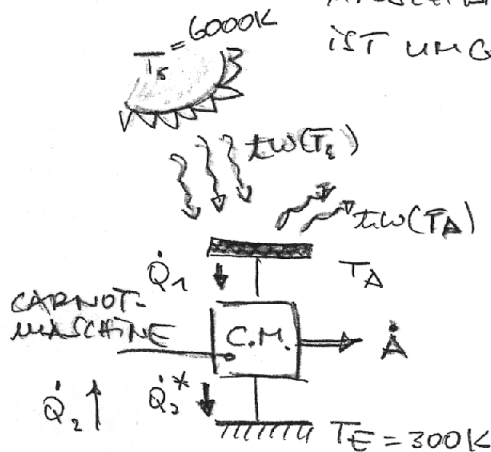
- ENERGIE TRANSFER VIA PHOTONEN

(PLANCKSCHES GEFETZ)

$$\dot{E}_i \sim G \cdot T_s^4$$

PRINZIP: • SOLARE PHOTONEN ABSORBIEREN

- ABSORBER MIT TEMP. T_A AN CARNOT-MASCHINE (SEITE DER HOHEREN TEMP. ANSCHLIEßEN; NIEDERTEMP.-RESERVOIR IST UMGEBUNG (z.B. ERDE MIT $T_E = 300K$))



$$\dot{A} = \dot{Q}_1 \cdot \eta_{\text{CARNOT}}(T_A, T_E) = \dot{Q}_1 \left(1 - \frac{T_E}{T_A}\right)$$

BILANZ DER ENERGIEFLÜSSE FÜR ABSORBER

(STATIONÄRER BETRIEB)

EINGANG Z. ABSORBER:

- VON DER SONNE (T_s)

$$f \cdot G \cdot \epsilon_s \cdot \alpha_A \cdot T_s^4$$

f RAUHWINKEL, UNTER DEM ABSORBEN DIE SONNE SIEHT

ϵ_u, α_i EMISSIONS- UND ABSORPTIONSKOEFFIZIENTEN

- VOM WETTRaum (UMGEBUNG (T_u))

(u)

$$(1-f) \cdot G \cdot \epsilon_u \cdot \alpha_A \cdot T_u^4$$

AUSGANG VOM ABSORBER:

- ABSTRAHLUNG (IN 4π -RAUHWINKEL)

$$1 \cdot G \cdot \epsilon_A \cdot T_A^4$$

- ENTZUG VON $\dot{Q}_1$ FÜR CARNOT-MASCHINE

$$\rightarrow \dot{Q}_1 = \dot{A} \left(\frac{1}{\eta_{\text{CARNOT}}} \right) = f \cdot G \cdot \epsilon_s \cdot \alpha_A \cdot T_s^4 + (1-f) \cdot G \cdot \epsilon_u \cdot \alpha_A \cdot T_u^4 - 1 \cdot G \cdot \epsilon_A \cdot T_A^4$$

mit $\eta_{\text{Carnot}} = (1 - \frac{T_E}{T_A})$ UND VERNACHLÄSS. VON T_u^4 -TERM

$$\Rightarrow \dot{A} = \left[1 - \frac{T_E}{T_A}\right] \cdot \left[f \cdot G \cdot \epsilon_s \cdot \alpha_A \cdot T_s^4 + (1-f) \cdot G \cdot \epsilon_u \cdot \alpha_A \cdot T_u^4 - G \cdot \epsilon_A \cdot T_A^4 \right]$$

~~WERT MAXIM MIT
(311)° ODER/UND
ENDE-UMGEBUNG
MIT (300K)°
VERNACHLÄSSIG
EBENSO MONDLICHT
UND SONNE!~~

NORMIERUNG MIT

$$f \cdot G \cdot \epsilon_s \cdot \alpha_A \cdot T_s^4 = \dot{Q}_1$$

GRT WIRKUNGS GRAD DER
PHOTONEN-MASCHINE (METER-MASCHINE)

ZUSAMMEN FÜR IDEAL "SCHWARZE STRAHLEN /

$$\eta_{\text{MUESCH}} = \left[1 + \frac{(1-f) \cdot T_u^4}{f \cdot T_s^4} - \frac{1}{f} \cdot \frac{T_A^4}{T_s^4} \right] \left[1 - \frac{T_E}{T_A} \right]$$

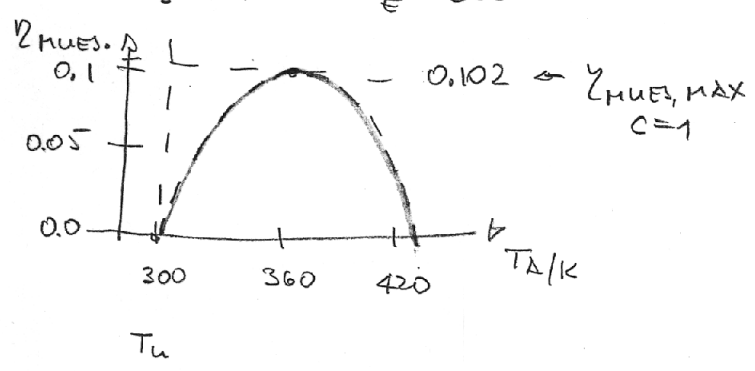
"ABSORBER"
 $\alpha_i = 1; \epsilon_i = 1$

a) FÜR $f \approx 2.23 \times 10^{-5}$; SPRICHT, KEINE KONZENTRATION DER
SOLARSTRALHLUNG (= AMO $\rightarrow 1.3 \text{ kW/m}^2$)

WIRD

$$\eta_{\text{MUESCH}} \approx \left[1 - \frac{T_A^4}{T_s^4} \cdot \frac{1}{f} \right] \cdot \left[1 - \frac{T_E}{T_A} \right]$$

FÜR $T_s = 5700 \text{ K}, T_E = 300 \text{ K}$



IN DER REALEN ANWENDUNG $\eta_{\text{MUESCH}} > 0.102$ WERD
ABSORBER HIER SPÄR. LHM. (MIT EMISSION IN 4π RAUM-
WINKEL) ANGENOMMEN WURDE;

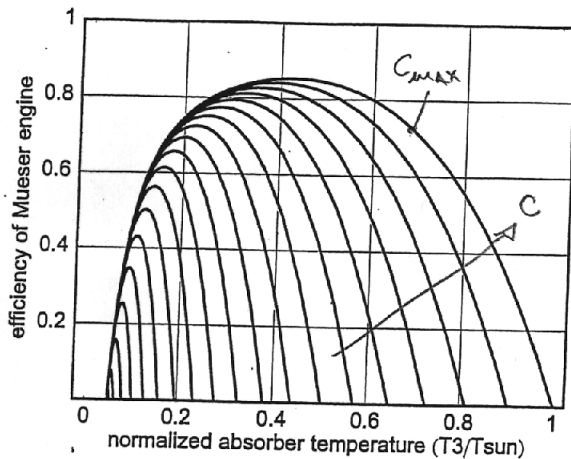
→ BEDEUTET GEOM. DESIGN → FLACH UND MIT
RÜCKSEITIGER ISOLATION FÜR EMISSION

→ QUASI-KONZENTRATIONSFaktor VON $C^* = 4$
(ANSTATT 4π NUR 1.π)

b) SOLAR THERMISCHER KONVERTER MIT KONZENTRATION
DER SOLARSTRALHUNG

4-5

WIRKUNGSGRAD DER PHOTONEN-MASCHINE (MUESER-MASCHINE)
NUMERISCH



$$\eta_{\text{MUES.}}(C_{\text{MAX}}) = 0,84$$

$$T_3 = T_A(\eta_{\text{MUES.}})_{\text{MAX}} = 2410 \text{ K}$$

ANALYTISCHES:

$$\text{DAN } \eta_{\text{MUES}} = \left[1 - \left(\frac{T_A}{T_S} \right)^4 \cdot \frac{1}{f} \right] \left[1 - \frac{T_E}{T_A} \right]$$

FOLGT FÜR

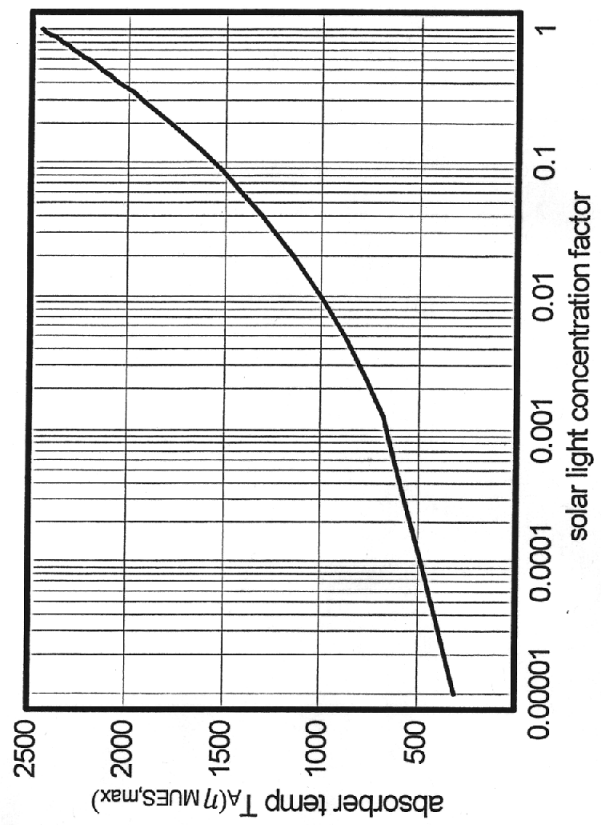
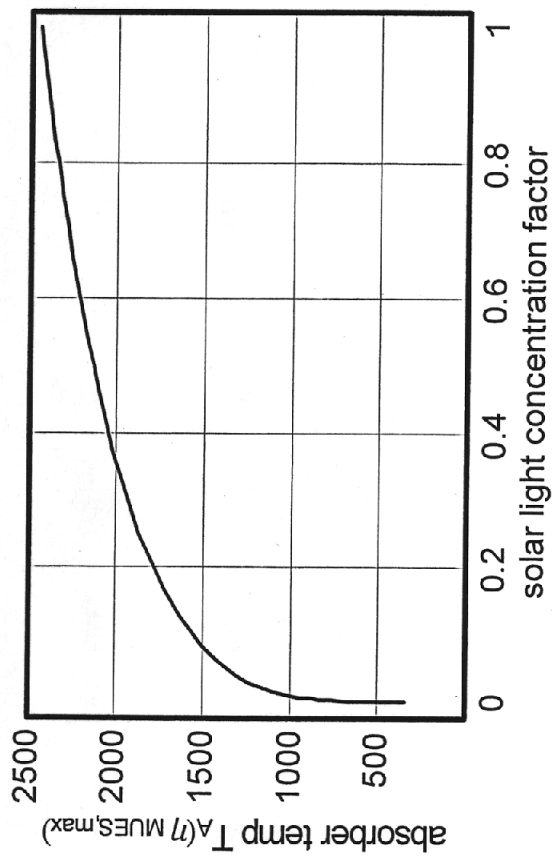
$$\frac{d\eta_{\text{MUES}}}{dT_A} = 0!$$

$$\left(1 - \frac{T_E}{T_A} \right) \left(-\frac{4T_A^3}{T_S^4} \cdot \frac{1}{f} \right) + \left(1 - \frac{T_A^4}{T_S^4} \cdot \frac{1}{f} \right) \left(\frac{T_E}{T_A^2} \right) = 0 \quad \text{UND DARAUSS}$$

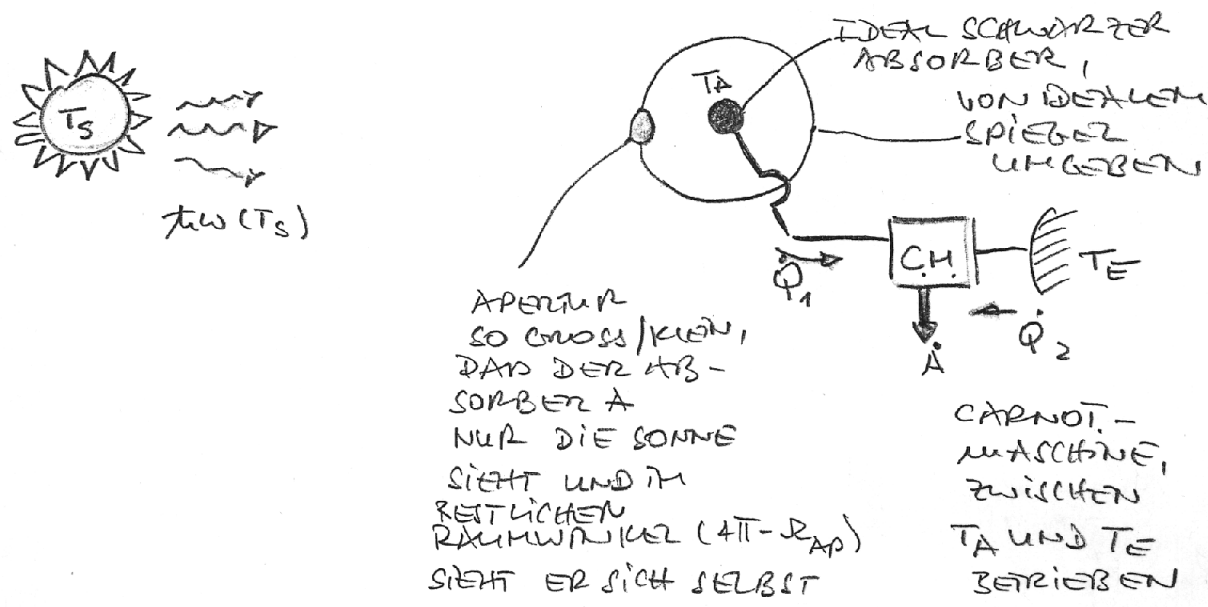
$$\vdots$$

$$-4T_A^5 + 3T_A^4 \cdot T_E = f \cdot T_S^4 \cdot T_E$$

$$\leadsto T_A = T_A(f, \eta_{\text{MUES.}})_{\text{MAX}}, T_S, T_E)$$



4.3 GEOMETRISCHES DESIGN FÜR MUETER-MASCHINE MIT MAX. KONZENTRATION DER SOLARSTRALHUNG (P. WÜRTER)



FÜR $\dot{Q}_1 \rightarrow 0$: ABSORBENT GIBT KEINE WÄRME (NETTO)
 $AB \leadsto TA \rightarrow TS \leadsto \dot{A} = 0!$

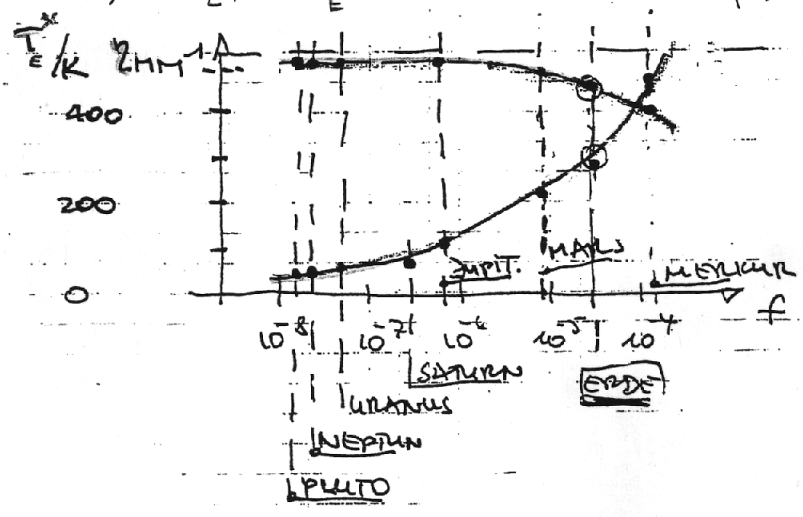
FÜR $\dot{Q}_1 \rightarrow \dot{Q}_{1,MAX} \leadsto TA \rightarrow T_{A,MIN} \leadsto \dot{A} = 0$ WEIL $T_C \rightarrow T_E$

OPTIMALER BETRIEB (WIRKUNGSGRAD WIRD MAXIMAL)

FÜR $T_E < T_A^* < T_S$

T ABHÄNGIGKEIT DES MUETER-WIRKUNGSGRADES VON DER SOLAREN FLUENSDICHTE (spricht ENTFERNUNG VON DER QUELLE = SONNE)

2) $T_E^* = T_E^*(d)!$ UND 3) $\eta_{HM} = \eta_{HM}(T_2)$



T EINSCHUB: KONZENTRATIONSBÄHÄNGIGKEIT DES WIRKUNGS-
GRADES

4-6a)

$$\text{Aus } \eta_{\text{max}} = \left[1 + \left(\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_5} \right)^4 \cdot \left(\frac{1}{f} - 1 \right) - \left(\frac{\bar{T}_3}{\bar{T}_5} \right)^4 \cdot \left(\frac{1}{f} \right) \right] \cdot \left[1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_3} \right]$$

→ MAX WIRKUNGSERAD → BESTIMMEN VON INTERMEDIÄREN
TEMPERATUR $\bar{T}_3$

$$\Rightarrow \frac{d\eta}{d\bar{T}_3} = \left(-4 \cdot \frac{\bar{T}_3^3}{\bar{T}_5^4} \cdot \frac{1}{f} \right) \cdot \left(1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_3} \right) + \left[1 - \left(\frac{\bar{T}_3}{\bar{T}_5} \right)^4 \cdot \left(\frac{1}{f} \right) + \left(\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_5} \right)^4 \cdot \left(\frac{1}{f} - 1 \right) \right] \cdot \left[-\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_3^2} \right] = 0$$

$$\leadsto -4\bar{T}_3^3 \left(\frac{1}{f} \right) \left(1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_3} \right) + \bar{T}_5^4 \left(\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_3^2} \right) - \left(\frac{1}{f} \right) \cdot \bar{T}_3^4 \cdot \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_3^2} + \frac{\bar{T}_2^4 \cdot \bar{T}_2}{\bar{T}_3^2} \left(\frac{1}{f} - 1 \right) = 0$$

$$-4\bar{T}_3^2 \left(\frac{1}{f} \right) + 4\bar{T}_3^2 \cdot \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_3} \cdot \frac{1}{f} + \bar{T}_5^4 \cdot \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_3^2} - \frac{1}{f} \bar{T}_3^2 \cdot \bar{T}_2 + \left(\frac{1}{f} \right) \frac{\bar{T}_2^4 \cdot \bar{T}_2}{\bar{T}_3^2} - \frac{\bar{T}_2^4 \cdot \bar{T}_2}{\bar{T}_3^2} = 0 \quad | \cdot \bar{T}_3$$

$$-4\bar{T}_3^5 \cdot \frac{1}{f} + 4\bar{T}_3^4 \cdot \bar{T}_2 \cdot \frac{1}{f} + \bar{T}_5^4 \cdot \bar{T}_2 - \frac{1}{f} \bar{T}_2 \cdot \bar{T}_3^4 + \frac{1}{f} \cdot \bar{T}_2^4 \cdot \bar{T}_2 - \bar{T}_2^4 \cdot \bar{T}_2 = 0$$

$$\leadsto \bar{T}_3^5 \left(-4 \frac{1}{f} \right) + \bar{T}_3^4 \cdot \left[\frac{4\bar{T}_2}{f} - \frac{\bar{T}_2}{f} \right] = -\bar{T}_5^4 \bar{T}_2 - \frac{\bar{T}_2^5}{f} + \bar{T}_2^5$$

$$\bar{T}_3^5 (-4) + \bar{T}_3^4 (3\bar{T}_2) = \left\{ -\bar{T}_5^4 \bar{T}_2 - \bar{T}_2^5 \left[\frac{1}{f} - 1 \right] \right\} \cdot f$$

$$\Rightarrow \bar{T}_3^5 (-4) + \bar{T}_3^4 (3\bar{T}_2) = \bar{T}_2 \cdot \left[-\bar{T}_5^4 \cdot f - \bar{T}_2^4 (1-f) \right] \quad \bar{T}_i = \frac{\bar{T}_i}{\bar{T}_5}$$

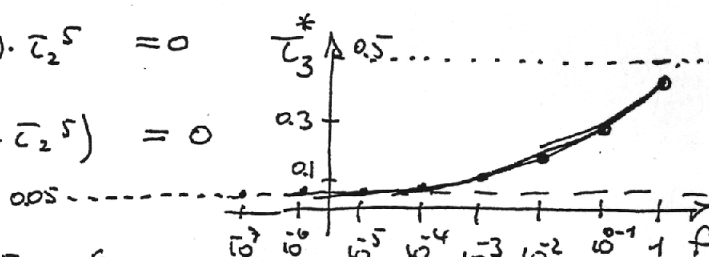
$$\frac{\bar{T}_3^5}{\bar{T}_5^5} (-4) + \frac{\bar{T}_3^4}{\bar{T}_5^4} \cdot \left(\frac{3\bar{T}_2}{\bar{T}_5} \right) = -\frac{\bar{T}_5^4 \cdot f \cdot \bar{T}_2}{\bar{T}_5^4 \cdot \bar{T}_5} - \frac{\bar{T}_2^5}{\bar{T}_5^5} (1-f)$$

$$\bar{T}_3^5 (-4) + \bar{T}_3^4 \cdot (3\bar{T}_2) = -f \bar{T}_2 - (1-f) \cdot \bar{T}_2^5$$

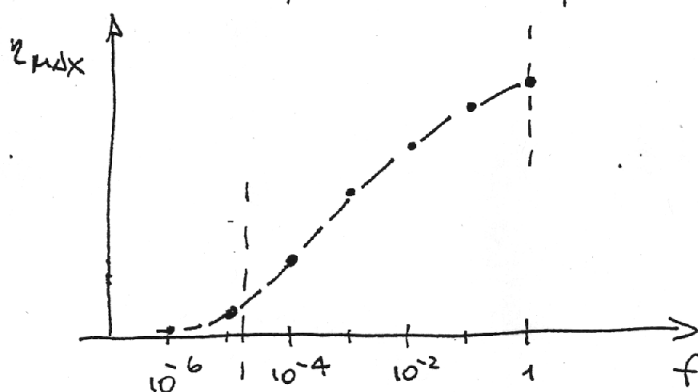
$$\bar{T}_3^* = \bar{T}_3 (\eta = \text{max})$$

$$\pm 4 \cdot \bar{T}_3^5 + 3\bar{T}_2 \cdot \bar{T}_3^4 + f \cdot \bar{T}_2 + (1-f) \cdot \bar{T}_2^5 = 0$$

$$4\bar{T}_3^5 - (3\bar{T}_2) \cdot \bar{T}_3^4 - (f \bar{T}_2 + (1-f) \cdot \bar{T}_2^5) = 0$$



$$\rightarrow \frac{f}{\bar{T}_3^*} \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c} 1 & 10^{-1} & 10^{-2} & 10^{-3} & 10^{-4} & 10^{-5} & 10^{-6} \\ \hline 2550 & 1620 & 1194 & 683 & 456 & 342 & 312 \end{array} \quad \text{für } \bar{T}_5 = 6000 \text{ K}$$

$$\Rightarrow \eta_{\text{max}} \begin{array}{c|c|c|c|c|c|c} 0.85 & 0.77 & 0.63 & 0.47 & 0.25 & 0.07 & 0.002 \end{array} \quad \bar{T}_2 = 300 \text{ K}$$


↑ NORMIERTE WIRKUNGSERAD

4.4 ANWENDUNGEN SOLAR THERM. ENERGIE

a) HOCHTEMP.-ABSORBER (KONZENTRATOREN)

→ KOMBINATION MIT STIRLUNG-MASCHINEN

→ EL. ENERGIE

b) NIEDERTEMP.-ABSORBER

→ HEIZUNG (WASSER, LUFT)

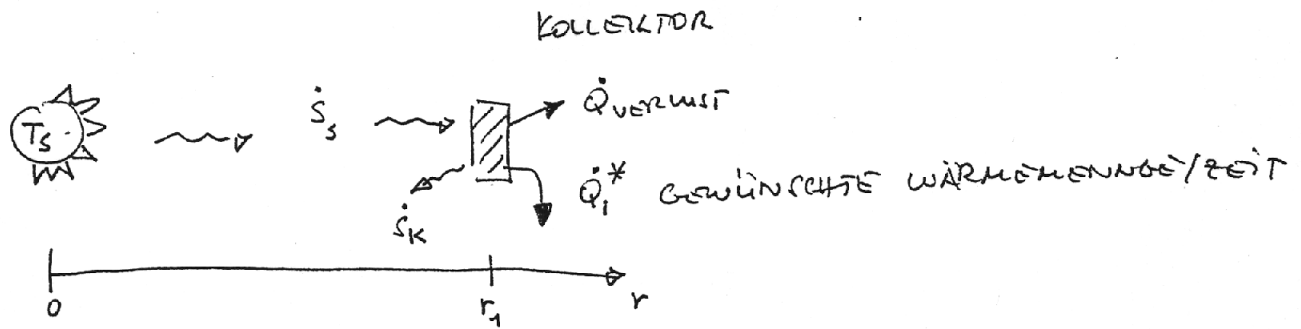
→ MEERESWASSERENTZEEUNG

→ SOLARE KLÜHUNG

→ WÄRMESPEICHER (SOLAR POND)

(b') PASSIVE SOLAR ARCHITECTURE)

c)

"Bilanz" für thermische Solar Kollektoren 4-8zum Kollektor:

$$\underbrace{\dot{S}_s(r_1) \cdot \alpha_k(w) \cdot A_{k, \text{ill}}}_{\text{SONNE AUF EMPF. FLÄCHE}} + \underbrace{S_0(T_0) \cdot \alpha_k^* \cdot A_k^*}_{\text{UMGEBUNG AUF GEGENST. NETZ. FLÄCHE}}$$

VOM Kollektor:

$$= \dot{S}_k(T_k, A_k^*) + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_{\text{verl}}$$

WÄRMELEITUNG, KONVEKTION, ...

→ ARBEIT AUS BEISPIELWEISE CARNOT / STIRLING MASCHINE

$$W = \dot{Q}_1 \cdot \eta = \dot{Q}_1 \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) = \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \left[\dot{S}_s \cdot \alpha_k \cdot A_k + \dot{S}_0 \cdot \alpha_k^* \cdot A_k^* - \frac{\dot{S}_k}{A} - \frac{\dot{Q}_{\text{verl}}}{A} \right]$$

mit $\dot{S}_s = \sigma \cdot \epsilon_s \cdot T_s^4 \cdot \left(\frac{R_s}{d_{se}}\right)^2 \cdot C$

$$\dot{S}_0 = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_0^4$$

$$\dot{S}_k = \epsilon_k \cdot \sigma \cdot T_k^4$$

WÜNSCHT:

GROSS VIA
KONZENTRAT.
UND $\alpha_k(w)$ KLEIN VIA SELEKT.
SCHICHTEN
 $\epsilon_k(w)$ KLEIN
VIA TECHNOLOGIE

$$\Rightarrow \frac{W}{\dot{S}_s} = \eta_{\text{GESAMT}} = \left[1 - \frac{T_0}{T_k}\right] \left[1 + (\dots) - (\dots) - (\dots)\right]$$

"UNGLEICHMÄSSIGE LOKALE BELEUCHTUNG"

$\leadsto I_0 = \bar{I}_0(x, y)$ KANN MIT STRAHUNGSBILANZBEZIEHUNG AUF LOKALE TEMPERATURVERTEILUNG BESCHRIEBEN WERDEN:

STRAHUNGSBILANZ (STATIONÄR) FÜR EIN FLÄCHENELEMENT dA

$$S_0 \cdot dA \cdot \alpha_A(\omega) = \varepsilon_A(\omega) \cdot G \cdot dA \cdot \varphi \cdot T_A^4$$

~~ABHÄNGIGKEIT~~

$$\leadsto \boxed{T_A = \left[\frac{\alpha_A}{\varepsilon_A} \cdot \frac{S_0}{G} \cdot \frac{1}{\varphi} \right]^{\frac{1}{4}}}$$

; φ "FAKTOR GESAMT-FLÄCHE / BELEUCHT. FLÄCHE"
(RAUMWINKEL FÜR ABG. / EMISSION)

$\leadsto$ z.B. 2 BEGRIFFE:

S_1 AUF A_1 ; S_2 AUF A_2 ($\varphi = 1$ GELTET)
($\alpha_i = \varepsilon_i$: NICHT SELEKTIV)

a) UNABHÄNG. CARNOT MASCHINEN

$$\dot{W}_1 = \left(\frac{T_1 - T_u}{T_1} \right) \cdot S_1 \cdot A_1 \quad \text{UND} \quad \dot{W}_2 = \left(\frac{T_2 - T_u}{T_2} \right) \cdot S_2 \cdot A_2$$

$$\leadsto \dot{W}_1 + \dot{W}_2 = S_1 A_1 \left(1 - \frac{T_u}{(S_1/G)^{\frac{1}{4}}} \right) + S_2 A_2 \left(1 - \frac{T_u}{(S_2/G)^{\frac{1}{4}}} \right)$$

$$\dot{W}_{\text{SEP.}} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2 = \underbrace{[S_1 A_1 + S_2 A_2]}_{S_{\text{GES.}} \cdot A^*} - \left[S_1 A_1 \frac{T_u}{(S_1/G)^{\frac{1}{4}}} + S_2 A_2 \frac{T_u}{(S_2/G)^{\frac{1}{4}}} \right]$$

$$\boxed{\dot{W} = S_{\text{GES.}} \cdot A^* - [A_1 \cdot S_1^{3/4} + A_2 \cdot S_2^{3/4}] T_u (G)^{\frac{1}{4}}}$$

B) "MISCHUNG" DER TEMPERATUREN / LOKALEN
STRAHUNGSDICHTE

4-10

$$(S_1 A_1 + S_2 A_2) \cdot \alpha = \varepsilon \cdot T_M^4 \cdot \sigma$$

$$T_M^4 = \frac{\alpha}{\varepsilon \sigma} (S_{\text{Ges}} A^*)^{\frac{1}{4}}$$

$$\leadsto \dot{W}_M = \left(1 - \frac{T_U}{T_M}\right) (S_{\text{Ges}} A^*)$$

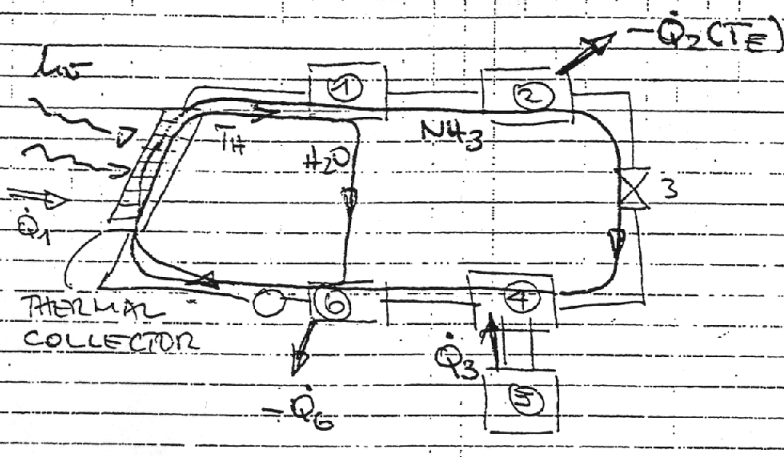
$$\dot{W}_M = S_{\text{Ges}} A^* - T_U \cdot \sigma^{\frac{1}{4}} [S_1 A_1 + S_2 A_2]^{\frac{3}{4}}$$

Vergleich: $(\alpha + \beta)^{\frac{3}{4}} > \left(\alpha^{\frac{3}{4}} + \beta^{\frac{3}{4}}\right) !$

$$\leadsto \boxed{\dot{W}_M < \dot{W}_{\text{SEP}}} \rightarrow \text{ENTROPIE - ERZEUGUNG
BEIM Mischen von
"TEMP." / LOKALEN
STRAHLDICHTE}$$

a) SOLAR THERMAL COOLING

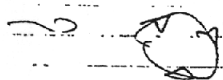
4-11



- ① BOILER
- ② CONDENSOR
- ③ VALVE
- ④ EVAPORATION CHAMBER
- ⑤ COOLING BOX
- ⑥ ABSORBER

Therm.
coll: RADIATION HEATS $H_2O + NH_3$

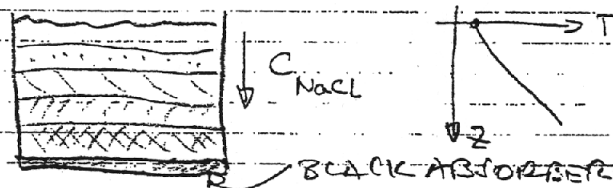
- ① NH_3 EVAPORATES FROM SOLUTION
 H_2O (SEPARATED) (LIQUID) FROM NH_3 (GASEOUS)
- ② NH_3 (GAS) CONDENSATES AT T_E (ENVIRONMENT.)
- ③ NH_3 (LIQUID) DROPS THROUGH VALVE-JET.
- ④ NH_3 "SEES" LARGE VOLUME^{*)} AND EVAPORATES
 $\rightarrow$ GETS COOLER, NEEDS HEAT FROM ENVIRONMENT =
 ⑤ FROM COOLING BOX $\rightarrow T_{COOL, BOX} < T_E !!$
- ⑥ $H_2O_{LIQ} + NH_3(GAS)$ MIXED $\rightarrow (H_2O + NH_3)_{LIQ}$
 $\rightarrow$ VOLUME REDUCED $\rightarrow$ PUMPING EFFECT WHICH WE
 NEED IN ③ OUTLET AND ④
 HEAT OF CONDENSATION TO ENVIRONMENT
 (IF NOT $P_{NH_3} \uparrow \rightarrow$ PUMPING EFFECT IS KILLED)
 $\rightarrow$ BACK TO COLLECTOR, FLOW BY TEMP. DIFF.



CYCLE FOR COOLING

2) SOLAR THERMAL STORAGE

SOLAR POND (THERMAL STORAGE)



LOOKS AT ENTRANCE
SURFACE MINIMIZED!
SINCE $T(z=0)$ SHALLEST!

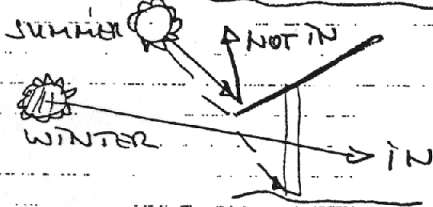
STABLE LAYERED NaCl-CONCENTRATION

$\frac{grad T}{z} \rightarrow \frac{grad \gamma}{z} \leftarrow$ SPECIFIC WEIGHT

HIGHER TEMP $\rightarrow$ VOL. EXPANSION
BALANCED BY HIGHER
NaCl CONCENTR.

f) SOLAR THERMAL APPLICATIONS EXCEPT DITCHES, TOWER, ETC...

PASSIVE ARCHITECTURE



4.5 KONZEPTE ZUR KONZENTRATION

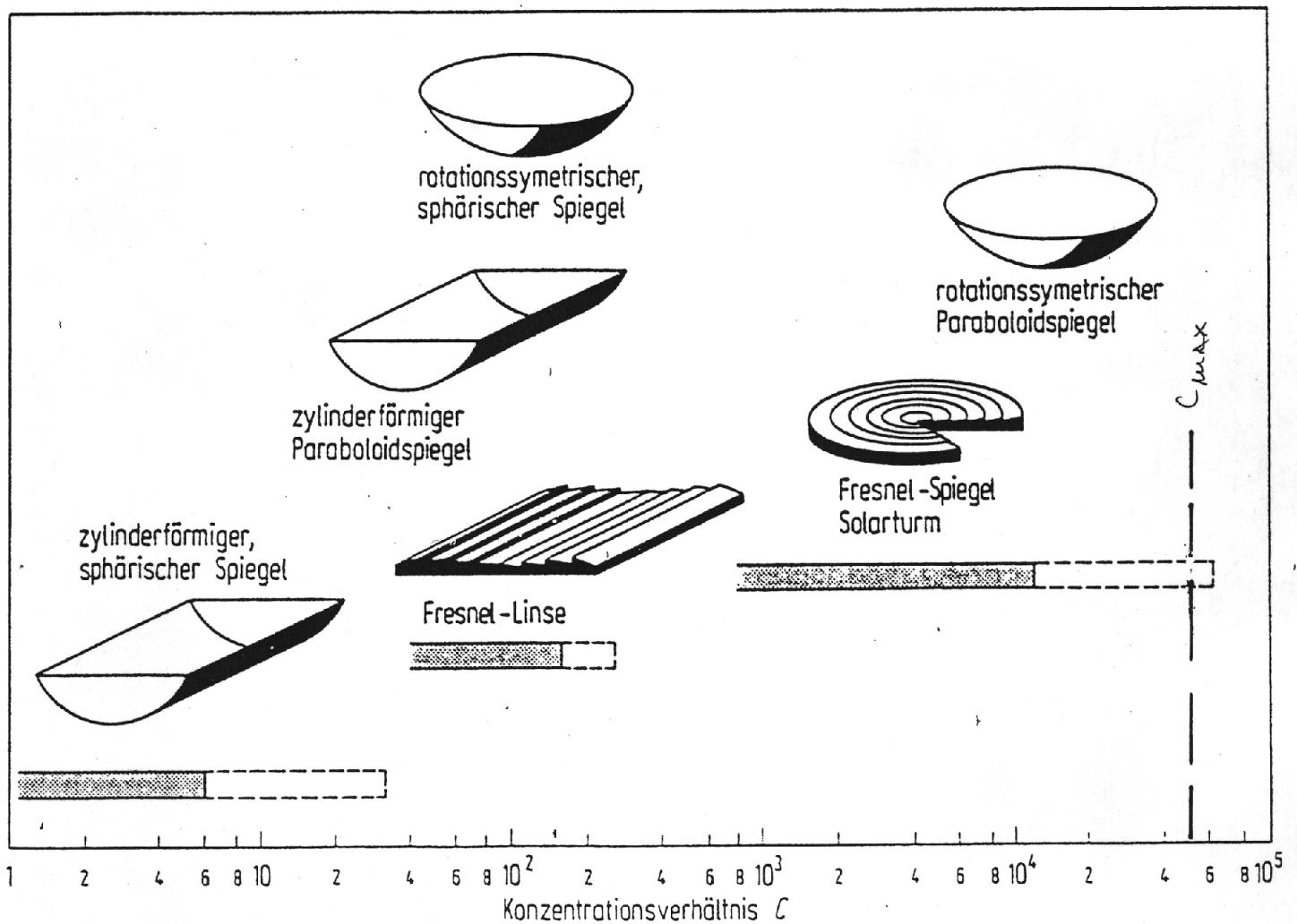
4-13

a) ABBILDENDE OPTISCHE ELEMENTE

$$C_{\max} = \left(\frac{R_s}{d_{se}}\right)^{-2} \approx 47000 \quad \left. \begin{array}{l} \text{für 2DIM} \\ \text{für TERR.-VERHÄLTNISSE} \end{array} \right\}$$

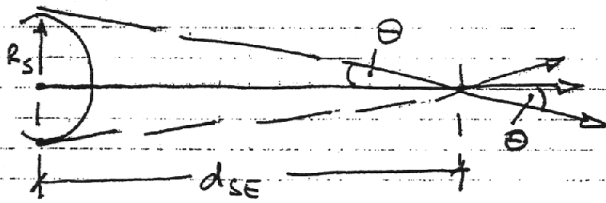
$$\text{UND } C_{\max} = \left(\frac{R_l}{d_{se}}\right)^{-1} \approx 218 \quad \left. \begin{array}{l} \text{für 1DIM} \end{array} \right\}$$

→ UNTERSCHIEDL. "AUFWAND" (KOSTEN)



Erreichbares Konzentrationsverhältnis verschiedener Spiegel- und Linsen.

AUS "H₂ ALS ENERGIE-
TRÄGER"
EDS. WINTER/NITSCH,
SPRINGER, BERLIN

b1) RICHTUNGS-DISPERSION DER SOLARSTRALHUNG

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_s}{d_{se}}\right)$$

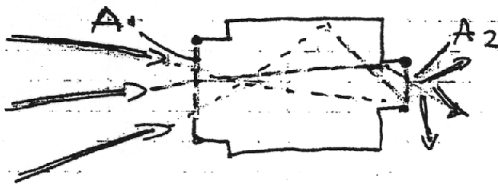
$$\text{für } \xi \ll 1 \rightarrow \arctan \xi \approx \xi$$

$$\text{mit } R_s = 6.9 \times 10^6 \text{ m}, d_{se} = 1.5 \times 10^{10} \text{ m}$$

$$\rightarrow \theta = 0.26^\circ$$

b2) STRALHUNGS KONZENTRATION FORMUL

WIRKSAME APERTUR FLÄCHEN A_1, A_2



A_1 WIRD MODIFIZIERT ZU A_1^* ALS AKZEPTIERTE APERTUR, ALSO DIE, INNERHALB (INKLUSIVE RANDLINIE) DER STRALHUNG NACH A_2 AUSGEKOPPELT WIRD

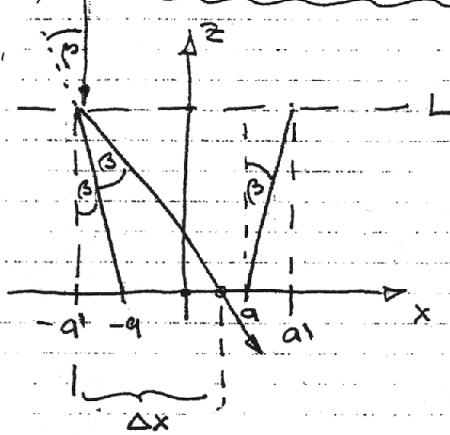
$$\rightarrow C = \frac{A_1^*}{A_2}$$

$$\text{UND } C_{\max} = \left(\frac{d_{se}}{R_s}\right)^2 = \left[\frac{1}{\tan \theta}\right]^2$$

13) LINEARE NICHT-ABBILDENDE STRUKTUREN (ALS EINFACHSTE KONZENTRATOREN)

1-FACH REFLEXION

a) PARALLELE STRAHUNG ($\theta = 0$)



EINTRITTSAPERTUR (RADIUS) a'

AUSTRITTSAPERTUR (RADIUS) a

$$\left(\frac{a'-a}{L}\right) = \tan \beta \rightarrow \beta = \arctan\left(\frac{a'-a}{L}\right)$$

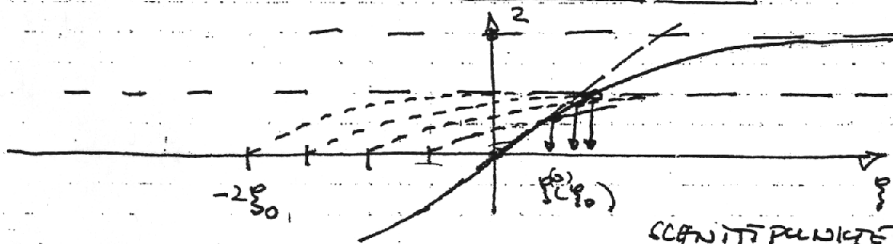
AKZEPTANZ-BEDINGUNG FÜR 1-FACHE REFLEXION $\Delta x = L \tan(2\beta) \leq a' + a$

$$\rightarrow L \cdot \tan\left[2 \arctan\left(\frac{a'-a}{L}\right)\right] \leq a' + a$$

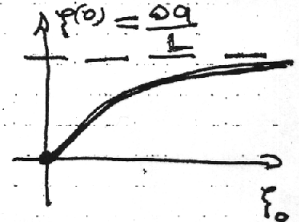
$$a' - a = \Delta a$$

$$\boxed{2 \arctan\left(\frac{\Delta a}{L}\right) \leq \arctan\left(\frac{2a + \Delta a}{L}\right)}$$

$$\text{mit } \frac{\Delta a}{L} = \xi; \quad \frac{a}{L} = \xi_0$$



SCHNITTPUNKTE
GEBEN $\xi(0) = \xi_0(\xi_0)$



ASYMPTOTE BEI $\frac{1}{2}$
 $\Rightarrow \xi_{\text{ASYMP}} = 0.46$

b) MIT RICHTUNGS-DISPERSIONSWINKEL θ

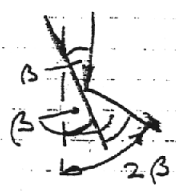
VON OBEN!

$$\rightarrow 2 \arctan\left(\frac{\Delta a}{L}\right) = 2\beta \rightarrow \text{JETZT} \rightarrow 2\beta + \theta!$$

$$\text{ALSO } 2\beta + \theta \leq \arctan\left[\frac{2a}{L} + a \tan \beta\right]$$

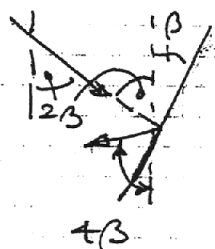
$$\rightarrow \boxed{\beta \leq \frac{1}{2} \left[\arctan\left[\frac{2a}{L} + a \tan \beta\right] - \theta \right]}$$

MULTIFACHREFLEXION



a) FÜR SENKRECHT EINFALLENDE STRAHUNG

→ 2β NACH 1. REFLEXION BEZOGEN AUF DIE URSPRÜNGLICHE PROPAGATIONSRICHTUNG



NACH 2. REFLEXION MIT 3β AUF SPIEGELFLÄCHE MIT 3β VON SPIEGELFLÄCHE, DIE JA UM β GEBEN PROPAGAT. RICHTUNG VOR DER WW MIT KONZENTRATOR GENEIGT IST.

→ 4β ZUR SENKRECHTEN DER ÖFFN. APERT.

3. REFLEXION ANALOG WEITER 4β+β ZWISCHEN SPIEGEL ALS EINFALLS- UND AUSFALLS RICHTUNG + 1.β WEGEN SPIEGELNEIGUNG → 6β

⇒ n REFLEXIONEN "BEUGEN" AUSBREITUNGSRICHT. IM KONZENTRATOR UM 2nβ GEBEN SENKRECHTE

→ MAX. ZAHL DER REFLEXIONEN, DAMIT NICHT RÜCKWÄRTS PROPAGIERT WIRD



$$\boxed{2n \cdot \beta < 90^\circ} \quad \text{ODER NUR}$$

$$n < \frac{90^\circ}{2\beta} \quad \text{ZUR KONZ. VERWENDBAR}$$

b) FÜR RICHTUNGSDISPERSION MIT θ

NACH 1. REFL. (2β+θ)

NACH 2. REFL. 2(2β+θ)

FÜR n-TE REFLEXION n(2β+θ)

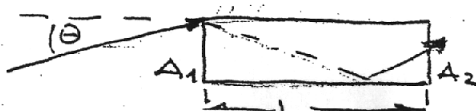
UND ZAHL DER MAX. REFL. VOR UMKEHR

$$\boxed{n(2\beta + \theta) < 90^\circ}$$

c) KONZENTRATION FÜR β=0?

WEGEN θ>0 → MÖGLICH? A₁*A₂ WIRKSAM! ANDEREN ALS

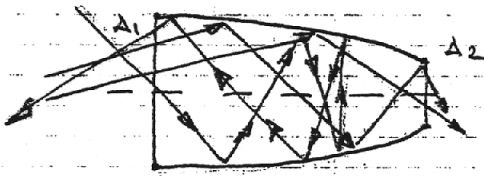
DIE GEOM. APERTURFLÄCHEN WEGEN θ>0 → ETENDUE! ERHALTEN



E) NICHTLINEARE "BEGRENZUNGSLINIEN"

4-17

(Z.B. COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR)



RANDSTRAHLPRINZIP: FÜR JEDEN WINKEL γ EX
SINE BEGRENZUNGSLINIE, DIE DIE "AKZEPTANZ" WIDER-
SPIEGELT;

LATZ RANDSTRAHL-PRINZIP - ALLE STRAHLEN AUF UND INNERHALB DIESER
BEGRENZUNGSLINIE WERDEN AKZEPTIERT (DURCH
 A_2 ANGEKOPPELT), SO DASS ES GENÜGT
DIE STRAHLEN (RANDSTRAHLEN) ZUANA-
WISSEN (ALLE INNERHALB DIESER DURCH
RANDSTRAHLEN FESTGELEGTE LINIE WERDEN
SOWIE SO NACH A_2 ANGEKOPPELT/KONZENTRIERT)

5. MAGNETOHYDRODYNAMIK (MHD)

5.1 PHÄNOMENOLOGISCHES

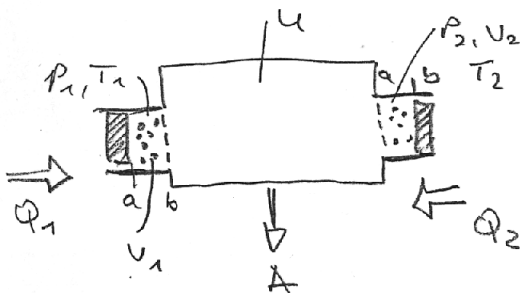
EXTRACTION DER KINETISCHEN ENERGIE EINER STRÖMENDEN, ELECTRISCH LEITFÄHIGEN MEDIUMS, DURCH SYMMETRIEBRECHUNG VIA TEILCHENABLENKUNG IN MAGNETFELDERN

→ LORENTZ-KRAFT

$$\vec{F}_{\text{LOR}} = z \cdot |e| \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

↑
ZAHLE DER ELEMENTAR-LADUNGEN

→ MHD-EFFEKT MIT OFFENEM THERMODYN. SYSTEM ZU BESCHREIBEN



VORGABE

$$P_1 = \text{konst.}$$

(TEILCHEN IN V_1 (ZWISCHEN U_1 UND "0") BEI T_1 UND P_1 DEM SYSTEM ZU FÜHREN)

$$P_2 = \text{konst.}$$

ANALOG

→ TEILCHEN

ZWISCHEN $U_2=0$ UND U_2 BEI T_2, P_2 AUS SYSTEM BRINGEN

INNERE ENERGIE

$$U = \text{konst.} \rightarrow dU = 0$$

MIT 1. HAUPTSATZ

$$\int Q = dU + p dV \text{ UND WEZEN}$$

$$Q_1 + Q_2 = A = U_1 + \int_0^{V_1} P_1 dV - U_2 - \int_0^{V_2} P_2 dV$$

$$\rightarrow A = (U_1 + P_1 V_1) - (U_2 + P_2 V_2)$$

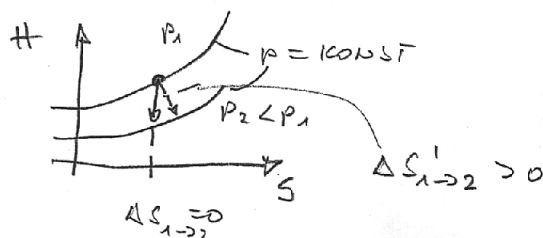
$$\boxed{A = H_1 - H_2}$$

ENTHALPIE DIFFERENZ

(UGL. POT. - FUNKTIONEN UND

LEGENDRETRANSFORMATION, KAP. 1)

→ DIAGRAMM ($H = H(S)$) (MOLLIER-DIAGRAMM)



T ANSCHAUUNG zu H-S-DIAGRAMM mit $p = \text{konst.}$

aus

$$H = U + pV \quad \text{FOLGT} \quad dH = dU + d(pV)$$

$$dH = n c_v dT + p dV + V dp = 0$$

$$\downarrow \quad \quad \quad \downarrow$$

$$V dp + n \cdot R dT \quad (\text{aus ID. GAS...})$$

$$\boxed{dH = n(c_v + R)dT}$$

mit 1. H.S. $T ds = p dV + n c_v dT$ (wegen $dp = 0$)

$$= n(R + c_v) dT = n \cdot c_p dT$$

FOLGT

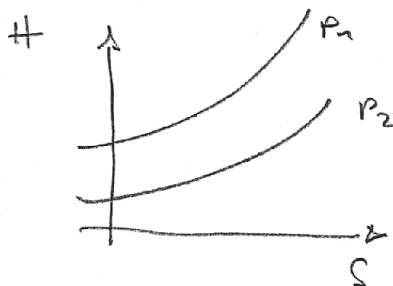
$$ds = \frac{1}{T} \cdot n(c_v + R) dT \quad \text{UND Daraus}$$

$$T = \exp\left(\frac{s}{n \cdot c_p}\right) \cdot \text{konst.} \quad ; \quad \text{Damit}$$

$$dT = \text{konst.} \cdot \left(\frac{1}{n \cdot c_p}\right) \cdot \exp\left(\frac{s}{n \cdot c_p}\right) \cdot ds \quad \text{UND}$$

$$dH = n \cdot (c_p) \cdot \text{konst.} \cdot \frac{1}{n \cdot c_p} \cdot \exp\left(\frac{s}{n \cdot c_p}\right) + \text{konst.}^1$$

$$\rightarrow H \sim G \cdot \exp\left(\frac{s}{n \cdot c_p}\right) + \text{konst.}^1$$



↓

Für VOLLSTÄNDIG REVERSIBLE SCHRITTE GILT

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = \frac{u_1 + p_1 V_1 - (u_2 + p_2 V_2)}{(u_1 + p_1 V_1)}$$

FÜR IDEALES GAS $u = n \cdot c \cdot T$; $pV = n \cdot R \cdot T$ UND

DARFUS

$$\eta = \frac{T_1(n \cdot c + n \cdot R) - T_2(n \cdot c + n \cdot R)}{T_1(n \cdot c + n \cdot R)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$(T_2 < T_1)$
 CARNOT-
 WIRKUNGS-
 GRAD

5.2 FORMALE BESCHREIBUNG VON MAGNETO-HYDRODYNAMISCHEN VORGÄNGEN

a) KONTINUITÄTSGLEICHUNG FÜR MASSEN

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0$$

ρ -MASS PRO VOLUMEN

b) FÜR ELEKT. LADUNGEN

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = \sum Q_i - \sum S_i$$

ρ -RICHMUNG

$\uparrow$
 QUELLEN SENKEN
 (IONISATION) (REKOMBINATION)
 TEILCHENSTROMDICHTE

c) FÜR WÄRME MENTGEN

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \bar{e}) + \text{div}(\rho \cdot \bar{e} \cdot \vec{v}) = \vec{j} \cdot \vec{E} - S + R$$

OPTISCHE VERLUSTE
 STRAHLUNG
 MECH. REIBUNG

d) BEWEGUNGSGLEICHUNG

MIT ÖRTLICH-ZEITLICHER ÄNDERUNG DER TEILCHEN-GEWINDIGKEIT

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad}(\vec{v})$$

GIBT

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} \right] = - \text{grad } p + \sum \vec{f}_i$$

DRUCK
 SONSTIGE
 ALLGEMEINE
 KRÄFTE

AUSGANGSGLEICHUNGEN

MODIFIKATION WGS.
VEREINFACHUNGEN
(STATIONARITÄT $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow 0$
1-DIMENSIONAL)

"Zusätze wie folgt"

KONTINUITÄT. ZÜR MATHSEN:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\boxed{\frac{d}{dx}(\rho \cdot v_x) = 0} \quad (1a)$$

BEWEISUNGSGERICHTUNG:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} \right) = -\text{grad } p + \sum f_i \rightarrow \quad (2)$$

$$\boxed{\rho v_x \cdot \frac{dv_x}{dx} = -\frac{dp}{dx} + \sum f_i} \quad (2a)$$

ENERGIEERHALTUNG:

$$\frac{\partial}{\partial t} (q \cdot \rho) + \text{div}(q \cdot \rho \cdot \vec{v}) = \vec{j} \cdot \vec{E} - \sum \epsilon R \quad (3)$$

$$S = 0, R = 0$$

$$\boxed{\rho v_x \cdot \frac{dq}{dx} + q \cdot \frac{d(\rho v_x)}{dx} = j_x \cdot E_x} \quad (3a)$$

$\approx$ WEGEN (2a)

q - VOLUMENSBETROGENE WÄRME ENSTANDEN

MIT $qQ = du + p dV$ (1. HS.)

WEITER

MIT $u = u + p v$ WIRD $dh = du + p dv + v dp$

UND $du = dh - p dv - v dp$

$\rightarrow qQ = dh - p dv - v dp + p dv$

$qQ = dh - v dp$ AUF VOLUMENX MATHE

BETROG. GRÖßEN

$$dq = dh - \frac{v dp}{\rho}$$

$\rightarrow q = h - \int \frac{1}{\rho} dp$

INTEGRATION LIEFERT

$$\rho \cdot v_x = \text{const.}$$

$\rightarrow \rho \cdot v_x \cdot A = \text{in MATHSEN-FLÄCHE DURCHGEHT}$

FÜR $\sum f_i = 0$ MIT

$$\rho v_x \frac{dv_x}{dx} = -\frac{dp}{dx} \rightarrow \int v_x dv_x = -dp$$

$$\rightarrow \rho \cdot \frac{v_x^2}{2} + p = \text{const}$$

(BERNOULLI!)

$$\boxed{\rho v_x \left(\frac{d}{dx} \left(h - \int \frac{1}{\rho} dp \right) \right) = j_x \cdot E_x} \quad (3b)$$

MIT (2a), SPRICHT

$$-\frac{dp}{dx} = \rho v_x \cdot \frac{dv_x}{dx} - \sum f_i$$

WIRD (3b)

$$\rho v_x \left[\frac{d}{dx} \left(h + \int \frac{1}{\rho} \rho v_x \cdot dv_x - \int \frac{1}{\rho} f_i dx \right) \right] = j_x \cdot E_x$$

UND

$$\boxed{\rho v_x \left[\frac{d}{dx} \left(h + \frac{v_x^2}{2} \right) \right] = j_x \cdot E_x + \frac{1}{\rho} \sum f_i \cdot \rho v_x} \quad (3c)$$

aus (3c) wird mit $\Sigma f_i = -j_x B_z$ (LORENTZ-TERM)

S-5

$$\boxed{\gamma \cdot v_x \cdot \frac{d}{dx} \left[h + \frac{v_x^2}{2} \right] = j_x (E_x - v_x B_z)}$$

→ LOKALE ÄNDERUNG DER SPEZIF. ENTHALPIE (h)
UND DER GESCHWIND. DES STRÖM. MEDIUMS
(IN FORM VON v^2 , ALSO DER KINET. ENERGIE)

ERGIBT ELEKTRISCHE AUSGANGSLEISTUNG

FÜR $\frac{d}{dx} \left(h + \frac{v_x^2}{2} \right) < 0$

GENERATOR

$$\eta_{\text{er}} = \frac{N_{\text{er}}}{N_{\text{ol}}}$$

$$[j_x (E_x - v_x B_z)] < 0$$

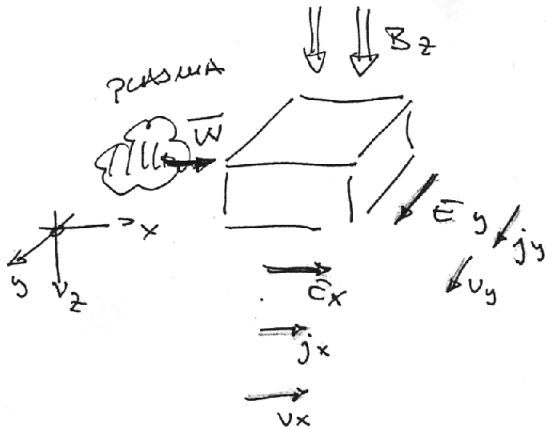
$$N_{\text{er}} = j (v_x B_z - E_x)$$

BEISPIELUNG (PLASMA)

$$[j_x (E_x - v_x B_z)] > 0$$

5.3 ELEKTRISCHES VERHALTEN DES MHD-GENERATORS

5-6



MAGNETFELD
 $\vec{B} = \{0; 0; B_z\}$

STRÖMUNG DES GASES/PLASMAS
 MIT GESCHWIND. $\vec{w} = \{w_x; 0; 0\}$
 (IST SOWIE SO VORHANDEN)

ZUSÄTZLICH NOCH
 STRÖMUNGSANTEILE
 $\vec{v} = \{v_x; v_y; 0\}$
 DURCH E. FELD

⇒ DANKS STROMDICHEN IN KOMPONENTEN

$$j_x = \sigma \cdot E_x + \sigma \cdot v_y \cdot B_z + \underbrace{w_x (n_+ q_+ - n_- q_-)}_{=0}$$

$$j_y = \sigma \cdot E_y - \sigma \cdot w_x \cdot B_z - \sigma \cdot v_x \cdot B_z$$

LADUNGSNEUTRAL,
 POS. UND NEG. ANTEILE
 DER RAUHLUNG
 KOMPENSIEREN SICH

FÜR STROMDICHTEN AUßERGEHT GILT $\vec{j} = |e| n \cdot \vec{v}$

UND $\sigma = n \cdot b \cdot |e|$

↑
 BEWEGLICHKEIT
 KONZENTRATION DER
 SPEZIES, DIE ZUM TRANS-
 PORT BEITRÄGT

$$\vec{v} = \frac{\vec{j}}{n \cdot e}$$

→ DAMIT WENDEN j_x UND j_y

$$j_x = \sigma \cdot E_x + \sigma \frac{j_y}{n|e|} \cdot B_z = \sigma \cdot E_x + \frac{n \cdot b \cdot |e|}{n \cdot |e|} \cdot j_y \cdot B_z$$

$$j_x = \sigma \cdot E_x + j_y \cdot b \cdot B_z \quad \text{UND}$$

$$j_y = \sigma (E_y - w_x B_z) - \frac{\sigma \cdot j_x}{n \cdot |e|} \cdot B_z \quad \text{ODER}$$

$$j_y = \sigma (E_y - w_x B_z) - j_x b \cdot B_z$$

ABKÜRZUNG $b \cdot B_z = \beta$ *)

*) VGL. GINSCHTIS ZUR GRÖßE β

via

$$j_x = \dots + \beta \cdot j_y \quad j_y = \dots - j_x \cdot \beta$$

$$j_x = G \cdot E_x + \beta \cdot G (E_y - \omega_x B_z) - \beta^2 j_x \quad \text{und}$$

$$j_y = G (E_y - \omega_x B_z) - \beta \cdot G \cdot E_x - \beta^2 j_y$$

$$j_x = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [E_x + \beta (E_y - \omega_x B_z)]$$

$$j_y = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [(E_y - \omega_x B_z) - \beta \cdot E_x]$$

IN BEIDEN KOMPONENTEN DER STROMDICHTE (j_x, j_y)

STECHEN $(E_y - \omega_x B_z)$ ALS TERM, DER DIE VON AUSSEN EINGEPÄSSTE GRI-(PLASMA)GESCHW. ENTHÄLT (ω_x)

UND DIE AUS DER MAGNETFELD WIRKUNG ENTGESSERTE EL.FELDSTÄRKE IN Y-RICHTUNG (AUS DER LADUNGSTRÄGERTRENNNUNG  IN MAGNETFELD)

$$\frac{E_y}{\omega_x B_z} = K \quad (\text{LASTFAKTOR}) \quad \text{mit} \quad 0 \leq K \leq 1,$$

WOBEI $K=1$ WENN $E_y - \omega_x B_z = 0$; j_x UND j_y

NUR AUS
 E_x, E_y UND G

→ MAX. SPANNUNG
AUS MHD-EFFEKT

→ LEERLAUF

$K=0 \rightarrow E_y = 0 \rightarrow$ KURZSCHLUSCH MIT

MAX. STROMDICHTE

$j_y = \text{MAX}$

"UMSCHREIBEN" DER STROMDICHTEN MIT TERM "K"

$$j_x = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [E_x + \beta(K-1)\omega_x B_z]$$

$$j_y = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [(K-1)\omega_x B_z - \beta \cdot E_x]$$

EINSCHUB ZUR GRÖßE $\mu \cdot B = \beta$

"STREUUNG VON LADUNGSTRÄGERN IN DER GASPHASE"

MITTLERE DRIFTGESCHW. v_D MIT

$$v_D = a \cdot \tau$$

a - BESCHLEUNIGUNG

τ ZEIT ZWISCHEN ZWEI STREUEFFEKTEN

$$\rightarrow \bar{v}_D = \frac{|e| \cdot \bar{E}}{m} \cdot \tau = \frac{|e| \cdot \bar{E}}{m} \cdot \frac{\lambda}{v_{TH}} \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{MITTLERE FREIE} \\ \text{WEGLÄNGE} \end{array}$$

MITTL. THERM.
GESCHW.

$$\Rightarrow \bar{E} \cdot b = \bar{v}_D \quad ; \quad b - \text{BEWEGLICHKEIT}$$

$$b = \frac{|e|}{m} \cdot \frac{\lambda}{v_{TH}}$$

IM MAGNETFELD

$$B \cdot b = \left(\frac{|e|}{m} \cdot \frac{\lambda}{v_{TH}} \right) \cdot B$$

$$\text{mit } |\vec{F}_{Lorentz}| = |e| \cdot v \cdot |\vec{B}|$$

$$\text{FOLGT } F_{Lor.} = \frac{m v^2}{r}$$

UND DAMIT

$$\frac{B \cdot e}{m} = \frac{v^2}{v \cdot r} = \frac{v}{r} = \frac{2\pi v}{2\pi r} = \frac{2\pi}{T_{Umlauf}} = \omega_{zyklon.}$$

$$\Rightarrow B \cdot b = \omega \cdot \frac{\lambda}{v_{TH}} = \beta = \omega \cdot \tau = 2\pi \cdot \frac{\tau}{T_{Umlauf}}$$

$\beta \ll 1 \rightarrow \tau \ll T_{Umlauf}$ (HÄUFIGE STREUUNG

STREUEFFEKT $\Rightarrow$ STOSS BESTIMMTES VERHALTEN)

$\beta > 1 \rightarrow \tau > T_{Umlauf}$ (LADUNGEN GYRIEREN

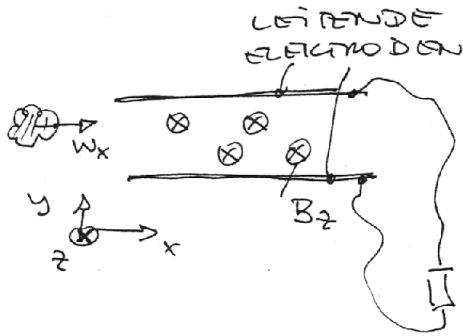
OFT BEVOR

STREUUNG AUFTRITT)



STOSS

$\rightarrow$ MAGNETFELD -
BESTIMMTES
VERHALTEN)

a) LINEARER FARADAY-GENERATOR

→ $E_x = 0$ UND STROMDICHEN ERGEBEN FOLGLICH

$$j_x = \frac{\sigma}{(1+\beta^2)} [\beta(K-1) \cdot w_x \cdot B_z]$$

$$j_y = \left(\frac{\sigma}{1+\beta^2} \right) [(K-1) w_x \cdot B_z]$$

(HIER WIEDERUM $K = \frac{E_y}{w_x \cdot B_z}$)

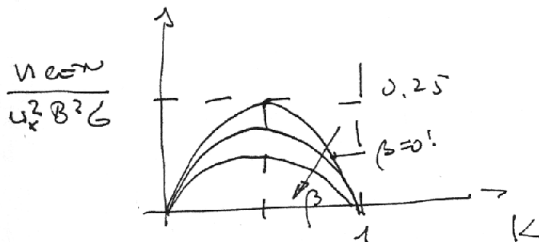
UND DAMIT WIRD AUSGANGSLEISTUNGSDICHTE (ELEKTRISCH)

$$n_{\text{GEN}} = \underbrace{-j_y \cdot E_y}_{\text{GENERATOR-BETRIEB!}} = \left(\frac{\sigma}{1+\beta^2} \right) (K-1) \cdot w_x \cdot B_z \cdot E_y \quad \text{UND MIT} \quad E_y = K \cdot w_x \cdot B_z$$

WIRD

$$n_{\text{GEN}} = \left(\frac{\sigma}{1+\beta^2} \right) \cdot K(K-1) \cdot w_x^2 \cdot B_z^2 \quad \rightarrow \text{OPTIMALER BETRIEB FÜR } K = \frac{1}{2}$$

FÜR $\beta = 0$ FOLGT



$$\frac{n_{\text{GEN}}}{w_x^2 B_z^2} = \frac{K(K-1)}{1+\beta^2}$$

n_{GEN} NUR SCHWACH VON β ABHÄNG.

n_{GEN} GROS FÜR $\beta \ll 1$

→ STOSSBESTIMMTES VERHALTEN

IN DEN FORMALEN BESCHREIBUNG

$(E_y - w_x \cdot B_z) \sim |e| \cdot E_y - |e| \cdot w_x \cdot B_z \leftarrow$ KRÄFTE DIE AUF DIE BELADENEN TEILCHEN WIRKEN
→ EL. FELD ABZÜGLICH LORENTZ-KRAFT

a) $(E_y - w_x \cdot B_z) = 0 \rightarrow$ KEINE LADUNGSTRENNUNG (LEERLAUF) UND $K = 1$

$$\hookrightarrow j_x = 0 \text{ UND } j_y = 0$$

b) $(E_y - w_x \cdot B_z) = -w_x \cdot B_z$, ALSO $E_y = 0 \rightarrow K = 0$; KURZSCHLUS

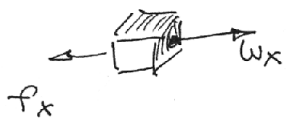
DANN IST

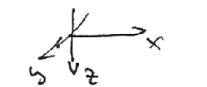
$$j_x = \left(\frac{\sigma}{1+\beta^2} \right) (-\beta w_x \cdot B_z) ; j_y = \left(\frac{\sigma}{1+\beta^2} \right) (-w_x \cdot B_z)$$

die LASTFAKTOR $K \leadsto$ BREMSKRAFT! f_x

5-10

(DIE PRO VORWENDEMENT WIRKT)

 $f_x = -j_y \cdot B_z = \left(\frac{G}{1+\beta^2}\right)(1-K) \cdot w_x \cdot B_z^2$

 $\rightarrow$ BREMSLEISTUNG

$$P_{\text{BREMS}} = \overline{f} \cdot \overline{v}$$

$$= -j_y \cdot w_x \cdot B_z$$

$$P_{\text{BREMS}} = \left(\frac{G}{1+\beta^2}\right)(1-K) w_x^2 \cdot B_z^2$$

$K=0 \rightarrow$ GRÖSSTE
BREMS-
WIRKUNG
(DUR KURZ-
SCHLUS)

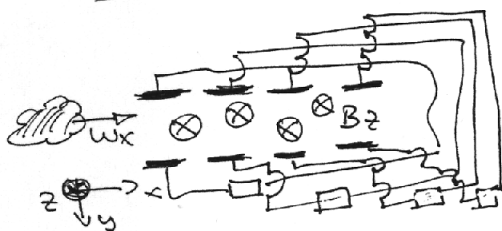
UND NUN SUCHT DARSTELLBAR

$$\frac{P_{\text{GEN}}}{P_{\text{BREMS}}} = \frac{\left(\frac{G}{1+\beta^2}\right) K (K-1) w_x^2 \cdot B_z^2}{\left(\frac{G}{1+\beta^2}\right) (1-K) w_x^2 \cdot B_z^2} = K$$

MIT $K \in [0, 1]$
GENERATOR

$K \in [-1, 0]$
PLASMAGESCHLEU-
NIGER

b) SEGMENTIERTER FARADAY-GENERATOR



HIER $j_x = 0 \leadsto \left(\frac{G}{1+\beta^2}\right)(E_x + \beta(K-1)w_x \cdot B_z) = 0$

$$\leadsto E_x = -\beta(K-1)w_x \cdot B_z$$

$$\text{UND } j_y = \left(\frac{G}{1+\beta^2}\right)[(K-1)w_x \cdot B_z + \beta^2(K-1)w_x \cdot B_z]$$

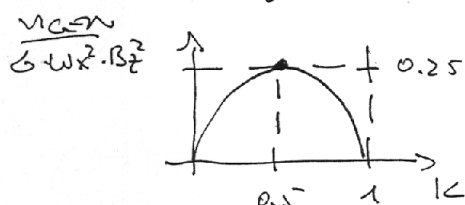
$$\leadsto j_y = \left(\frac{G}{1+\beta^2}\right)[(K-1)w_x \cdot B_z(1+\beta^2)] = G[(K-1)w_x \cdot B_z]$$

$\rightarrow$ LEISTUNG (GENERATOR BETRIEB)

$$P_{\text{GEN}} = -j_y \cdot E_y = -G(K-1)w_x \cdot B_z \cdot \overbrace{K \cdot w_x \cdot B_z}^{E_y}$$

$$P_{\text{GEN}} = G(1-K) \cdot K \cdot w_x^2 \cdot B_z^2$$

P_{GEN} UNABHÄNGIG VON β !



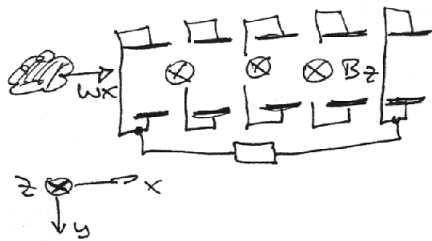
BREMSLEISTUNG

$$P_{\text{BREMS}} = -j_y \cdot w_x \cdot B_z$$

$$P_{\text{BREMS}} = -G[(K-1)w_x^2 \cdot B_z^2]$$

UND ANALOG (ZUR)

$$\frac{P_{\text{GEN}}}{P_{\text{BREMS}}} = \frac{G[(1-K)w_x^2 \cdot B_z^2] \cdot K}{-G[(K-1)w_x^2 \cdot B_z^2]} = K = \frac{E_y}{w_x \cdot B_z}$$



HIER $E_y = 0!$ UND DAMIT

$$i_x = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [E_x + \beta(-1) \cdot \omega_x B_z]$$

$$i_y = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [(-1)(\omega_x B_z + \beta \cdot E_x)]$$

→ DA $E_y = 0!$ → ANDEREN LASTFAKTOR NOTWENDIG

$$K' = \frac{E_x}{\beta \omega_x B_z} \quad \text{UND ZWAR AUS } i_x\text{-RELATION}$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{aligned} i_x &= \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [\beta \omega_x B_z (K' - 1)] \\ i_y &= \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [(-1)(\omega_x B_z (1 + \beta^2 K'))] \end{aligned}}$$

UND AUSGANGSLEISTUNG D. GENERATORS

$$P_{GEN} = -i_x \cdot \overbrace{E_x} = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [(1-K')(\beta \cdot \omega_x B_z)] \cdot K' \cdot (\beta \cdot \omega_x B_z)$$

$$\boxed{P_{GEN} = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [(1-K')K' \cdot \beta^2 \cdot \omega_x^2 B_z^2]}$$

WAS FÜR VON β DAMIT P_{GEN} GROSS WIRD?

$$P_{GEN} \sim \left(\frac{1}{1+\beta^2} \right) (-a + \beta) \rightarrow \text{ABLEITUNG } \frac{(1+\beta^2) - (\beta-a) \cdot 2\beta}{(1+\beta^2)^2} = 0$$

$$\rightarrow 1+\beta^2 - 2(\beta^2 + a^2\beta) = 0 \quad \text{ODER}$$

$$\beta_{1,2} = \frac{2a \pm \sqrt{4a^2 + 4}}{2} = a \pm \sqrt{a^2 + 1}$$

$$\text{MIT } a = \frac{E_x}{\omega_x B_z}$$

FOLGT

$$\beta_{1,2} = \frac{E_x}{\omega_x B_z} \pm \sqrt{\left(\frac{E_x}{\omega_x B_z} \right)^2 + 1}$$

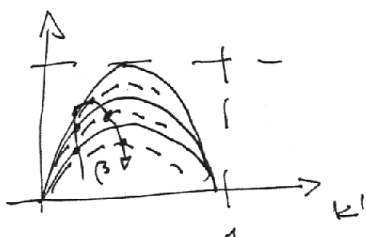
$$\text{UND } \beta_1 = \frac{E_x}{\omega_x B_z} + \sqrt{\dots}$$

⇒ GENERATOR

$$\beta_2 = \frac{E_x}{\omega_x B_z} - \sqrt{\dots}$$

BEZÜGLICH

$\frac{P_{GEN}}{\omega_x^2 B_z^2 G}$



BRUMSKLEINHEIT

$$f_{BRUMS} = -i_y \cdot B_z = \left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [\omega_x B_z (1 + \beta^2 K')]$$

BRUMSLEISTUNG

$$P_{BRUMS} = -i_y \cdot B_z \cdot \omega_x$$

$$\text{UND } \frac{P_{GEN}}{P_{BRUMS}} = \frac{\left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [(1-K')K'(\beta^2 \omega_x^2 B_z^2)]}{\left(\frac{G}{1+\beta^2} \right) [\omega_x^2 B_z^2 (1 + \beta^2 K')]} = \frac{\beta^2 K' (1-K')}{(1 + \beta^2 K')}$$

$v' = 0 \rightarrow E_x = 0 \rightarrow \text{KURZSCHLUSST}$ $\frac{U_{\text{GEN}}}{U_{\text{BREM}}} = 0$

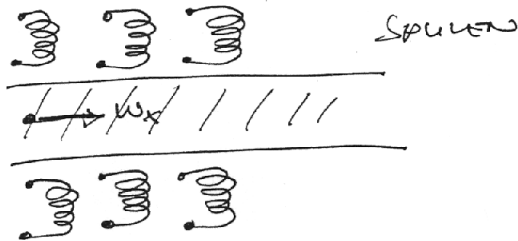
5-12

$v' = 1 \rightarrow E_x = \beta \cdot K' \cdot W_x \cdot B_z \text{ (LEERLAUF)}$ $\frac{U_{\text{GEN}}}{U_{\text{BREM}}} = 1$



d) ELEKTROMOTRORLOSE MHD-GENERATOREN

a) WANDERFELD-GENERATOR



- IN DEN COILS EX. MAGNETFELD, DAS MIT GESCHW. u_x WANDERT

- LEITFÄH. MEDIUM MIT GESCHW. w_x

$\Rightarrow$ WIE EINE "LINEARE" ANORDNUNG EINES "ASYNCHRONMOTORS" / "GENERATORS"

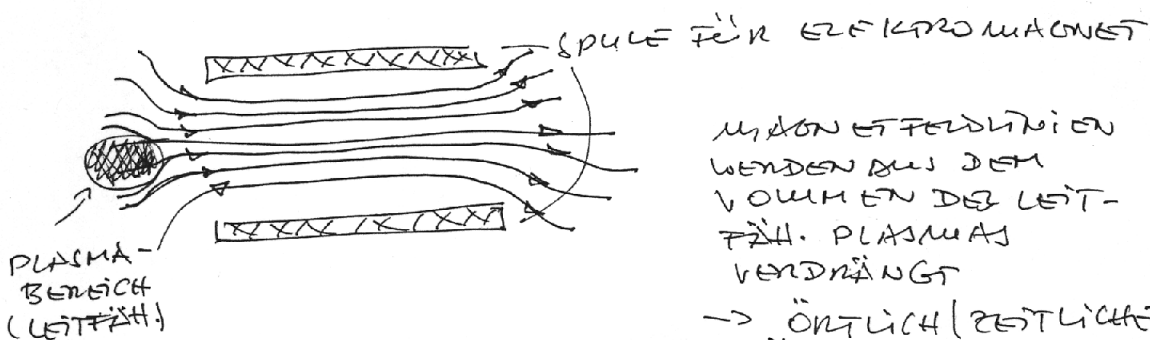
ALSO ELEKTRISCHE MASCHINE MIT DREH- ODER WANDERNDEN MAGNETFELD

$w_x < u_x \rightarrow w_x$ WIRD VERGRÖßERT (BESCHLEUNIGT)

$w_x = u_x \rightarrow$ KEIN EFFEKT

$w_x > u_x \rightarrow w_x$ WIRD VERMINDERT $\rightarrow$ STROM. MEDIUM WIRD GEBREMST ($\rightarrow$ GENERATOR)

b) FELDVERDRÄNGUNGSWANDLER



MAGNETFELD LINIEN WERDEN AUS DEM VOLUMEN DES LEITFÄH. PLASMAS VERDRÄNGT

$\rightarrow$ ÖRTLICH (ZEITLICH) ÄNDERUNG VON $\vec{B}(x,t)$

$\rightarrow$ SPANNUNG INDUZIENT IN DER SPULE

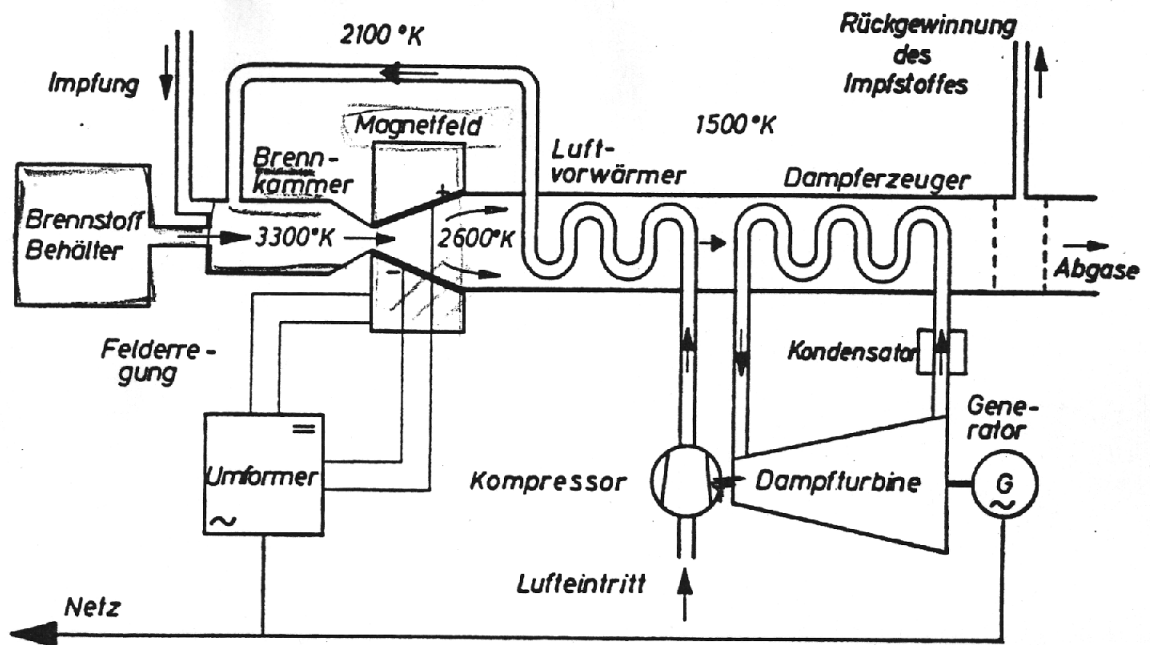


Abb. 108. Kombination eines offenen MHD-Generatorsystems mit einem konventionellen Kraftwerk

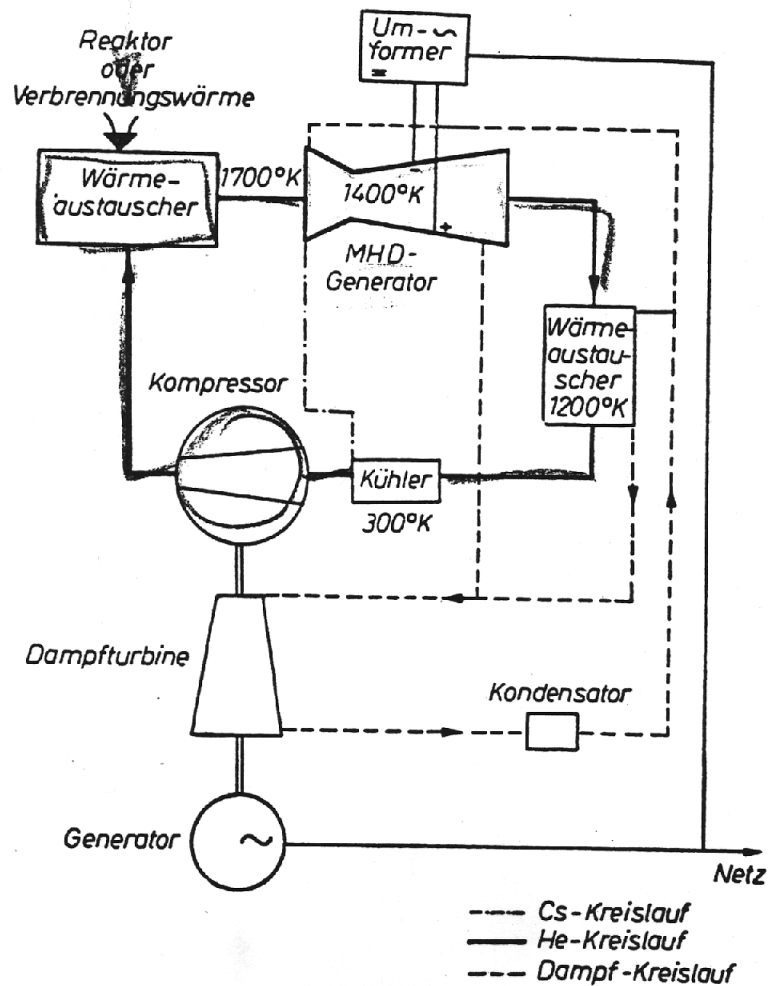
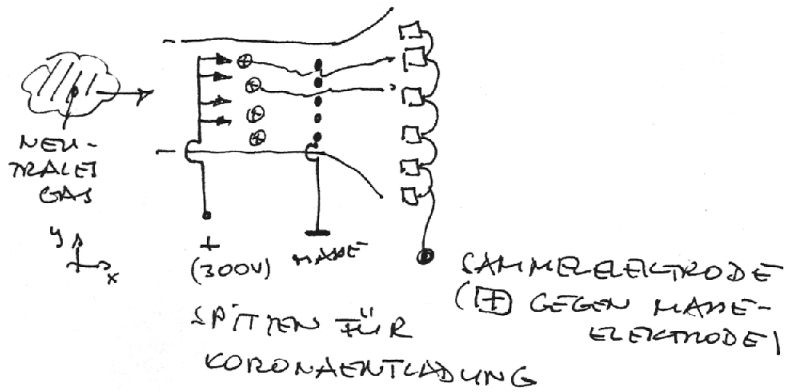


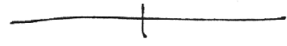
Abb. 110. Kombination eines geschlossenen MHD-Generatorsystems mit einem konventionellen Kraftwerk



POS. IONEN AN J
KORONAENTLADUNG
(GERINGE SPANNUNG
ABER WEG. GEOMETR.
FORM D. ELEKTRODEN
→ HOHE EL. FELDSTÄRKE)

WERDEN DURCH
IN PULS-ÜBERTRAG VON
NEUTRALTEILCHEN-STÖ-
RUNG AUF KAMMER-
ELEKTRODE TRANSPOR-
TIERT, UM SOFORT

AUFLADUNGEN VON $10^3 \dots 10^6$ VOLT ZU VERURSACHEN
(ANALOG VAN-DE-GRAAF-GENERATOR, ANSTATT MECH.
ANGETRIEB. GUMMI BAND, HIER NEUTRALTEILCHENSTÖRUNG)



5.5 "ZUGABEN"

a) SCHALLGESCHWINDIGKEIT

$$\rho = \frac{G}{V} = \frac{\text{Gewicht}}{\text{Volumen}}$$

Aus Kontinuitätsgleichung
und Bewegungsgleich.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \operatorname{grad}) \vec{v} \right) = - \operatorname{grad} p + \sum \vec{f}_i \quad (2)$$

Aus (1) und (2) für eindimensionale Betrachtung

$$(1a) \rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v_x) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$$

$$(2a) \rightarrow \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{mit } v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} \gg v_x$$

$$\rightarrow \rho \cdot \frac{\partial v_x}{\partial t} \approx - \frac{\partial p}{\partial x}$$

und daraus modifiziert sich (1a) zu

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

VORGANG WÄRMENÄNDERUNG $\leftrightarrow$ DRUCKGRADIENT (bei ohne
WÄRMEAUSTAUSCH MIT UMGEBUNG, ALSO ADIABATISCH)

$$\text{mit } \rho \cdot v^2 = \text{const.} \rightarrow d\rho \cdot v^2 + \rho \cdot 2v \cdot dv = 0$$

$$\text{und } d\rho = \frac{d\rho}{v} dv = 0; \text{ wegen } \rho = \frac{G}{V}$$

$$\rightarrow dv = - \frac{G}{\rho^2} d\rho$$

$$\text{Wird } d\rho - \frac{d\rho}{v} \left(- \frac{G}{\rho^2} \right) d\rho = d\rho + \frac{d\rho}{\rho} d\rho = 0$$

$$\text{und } d\rho + d\rho \frac{1}{\rho} d\rho = 0 \text{ bzw. } \left[\frac{\partial p}{\partial \rho} = \rho \cdot \frac{p}{\rho} \right] \quad (4)$$

$$(3) \text{ wird mit } (4) \quad \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} = - \frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

und DIFFERENTIATION NACH x BEI $\frac{\rho_0 p_0}{\rho_0} = \text{const}$ GIBT

$$\left[\rho_0 \frac{\partial^2 v_x}{\partial t \partial x} = - \frac{\rho_0 p_0}{\rho_0} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \right]$$

UND DIFF. NACH t ANALOG

$$\left[\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = - \rho_0 \frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial t} \right]$$

$$\text{Daraus } \left(\frac{\rho_0 p_0}{\rho_0} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} \right)$$

WELLENGLICHUNG MIT
PROPAGATIONSGESCHW.

(PHASENGESCHW.) ohne DISPERSION

$$v = v_{\text{SCHALL}} = \sqrt{\frac{\rho_0 p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\rho_0 \cdot R \cdot T}$$

b) LAVAL-DÜSE

5-16

ANSATZ: 1-DIMENSIONAL UND STATIONÄR

AUS KONT. GL. : $\frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v_x) = 0 \rightarrow \rho \cdot v_x \cdot \overset{\text{Fläche}}{A} = \text{konst.} = \overset{\text{MASSENDURCHSATZ}}{\dot{m}}$

DARAUSS:

$$\frac{(dA) \cdot v_x \cdot \rho}{A \cdot v_x \cdot \rho} + \frac{(dv_x) A \cdot \rho}{A \cdot v_x \cdot \rho} + \frac{(d\rho) A \cdot v_x}{A \cdot v_x \cdot \rho} = 0$$

$$\rightarrow \frac{dA}{A} + \frac{dv_x}{v_x} + \frac{d\rho}{\rho} = 0$$

FOLGT $\boxed{\frac{dA}{A} + \frac{dv_x}{v_x} = \frac{d\Omega}{\Omega}} \quad (5)$

mit $\rho = \frac{1}{\Omega}$ (spez. Volumen (-Größe))

$$\frac{d\rho}{d\Omega} = -\frac{1}{\Omega^2} \dots$$

AUS BEWEGUNGSGLEICH.

$$\rho \cdot v_x \frac{dv_x}{dx} = -\frac{dp}{dx} + \cancel{\frac{\rho}{2} f_i}$$

FOLGT

$$\rho \cdot v_x \frac{dv_x}{dx} = -\frac{dp}{dx}$$

$$\text{und } \rho \cdot v_x \cdot dv_x = -dp$$

UND MIT Ω ANSTELLE VON ρ

$$(6) \quad \boxed{\frac{v_x dv_x}{\Omega} = -dp} \rightarrow \frac{dv_x}{v_x} = -\frac{\Omega}{v_x^2} dp$$

MIT ADIABATEN-RELATION

$p \cdot v^\kappa = \text{const}$ UND MIT

$$\Gamma = \frac{1}{\kappa}; \quad \Omega = \frac{1}{v}$$

WIRD

$$\frac{dp}{p} + \Gamma \frac{d\Omega}{\Omega} = 0 \quad \text{ODER} \quad \boxed{\frac{d\Omega}{\Omega} = -\frac{1}{\Gamma} \frac{dp}{p}} \quad (2)$$

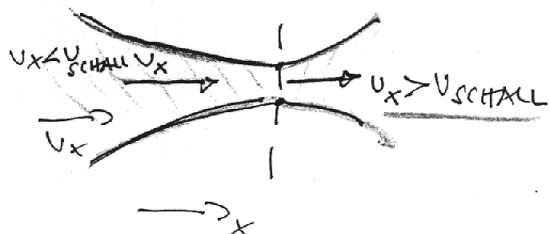
DARAUSS (5), (6), (2)

$$\frac{dA}{A} = \frac{d\Omega}{\Omega} - \frac{dv_x}{v_x} = -\frac{1}{\Gamma} \frac{dp}{p} + \frac{\Omega}{v_x^2} dp$$

$$\frac{dA}{A} = \left(\frac{\Omega}{v_x^2} - \frac{1}{\Gamma p} \right) dp \rightarrow \frac{dA}{A} = \left(\frac{\Omega \Gamma p - v_x^2}{v_x^2 \Gamma p} \right) dp$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{dA}{A} = \left(\frac{v_{\text{schall}}^2 - v_x^2}{\Gamma \cdot p \cdot v_x^2} \right) dp}$$

$\Rightarrow$ STÖRUNG DURCH (1-DIM.) KONTUR MIT ERHÖHUNG DER GESCHWINDIGKEIT



FÜR $v_x < v_{\text{schall}} \rightarrow \frac{dA}{A} < 0!$
QUERSCHNITT VERKLEINERN!
(BERNOULLI)

FÜR $v_x > v_{\text{schall}} \rightarrow \frac{dA}{A} > 0!$
QUERSCHNITT VERGRÖßERN!
FÜR WEITERE VERGRÖß. VON v_x

$\rightarrow$ LAVAL-DÜSE

6. BRENNSTOFFZELLE (FUEL CELL)

6.1 PHÄNOMENOLOGISCHES / PRINZIPIEN

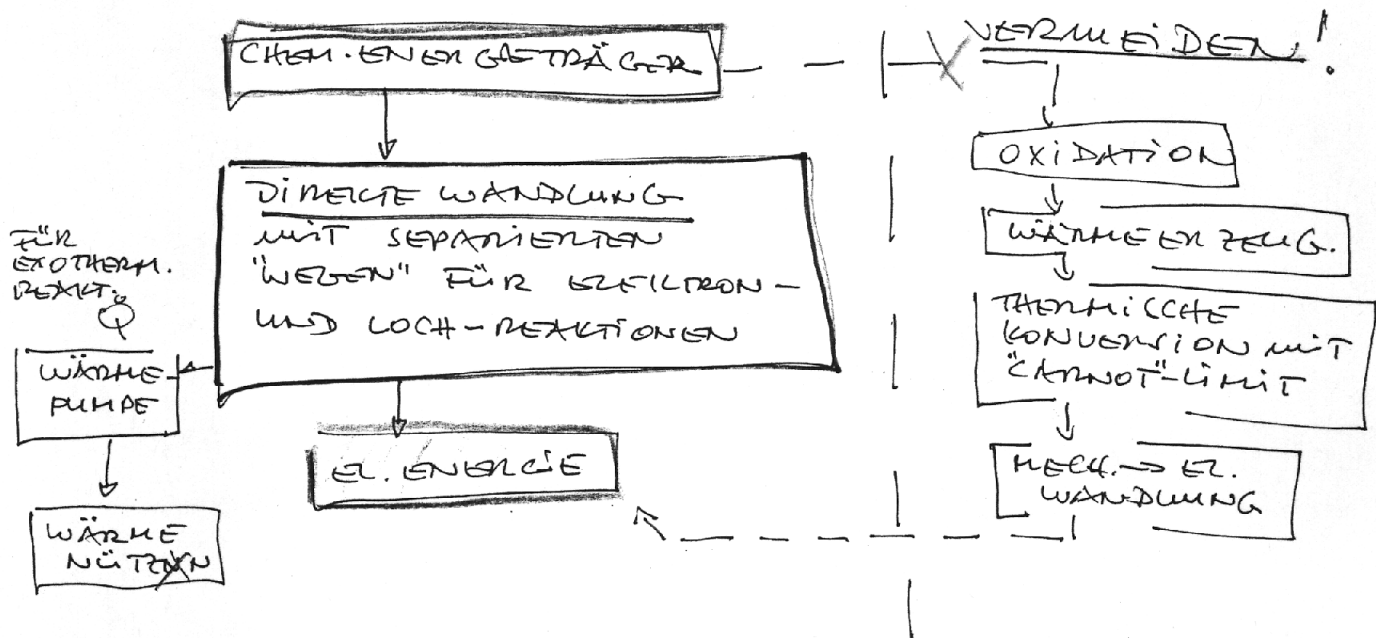
DIREKTE WANDLUNG VON CHEMISCHER ENERGIE VON SPEZIELEN (Z.B. OXIDATION / ELEKTONENTRANSFERS) IN ELEKTRISCHE ENERGIE OHNE UMWEG ÜBER THERMISCHE PROZESSE (LIMITS DURCH 2. HAUPTSATZ UMGHEHEN)

AUSGANGSSTOFFE / REAKTANTEN $H_2, CH_4, CH_3OH, C_2H_5OH$ ETC. ...

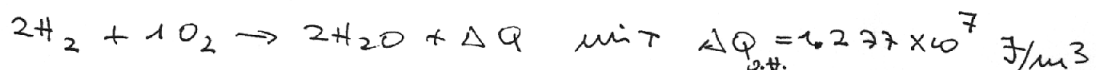
AUS a) FOSSILEN ENERGIETRÄGERN

b) AUS BIOMASSE (PFLANZEN + ANSCHLIEß. FERMENTIERUNGSSCHRITT)

c) AUS EVENTUELLER "WASSERSTOFFWIRTSCHAFT"



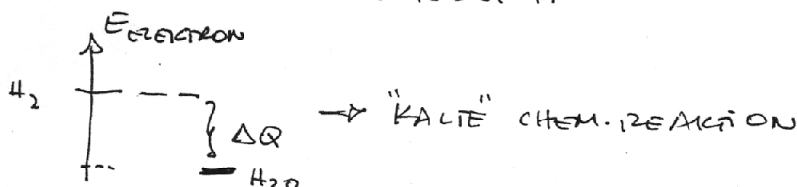
BEISPIEL: 1) OXIDATION VON H_2 ZU H_2O



$$\Rightarrow 3.0 \text{ eV} / H_2 \text{ MOLEKÜL} \\ = 1.5 \text{ eV} / H\text{-ATOM}$$

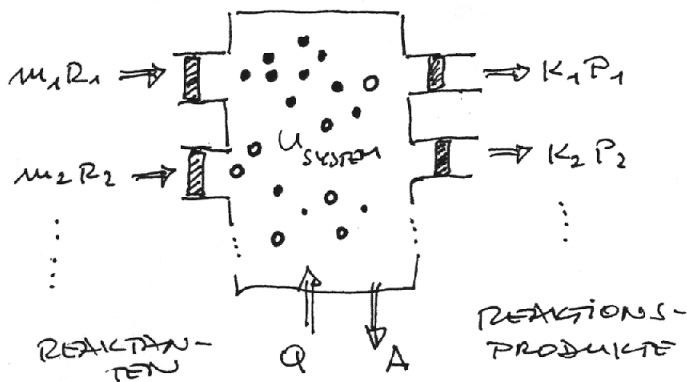
2) DIREKTE WANDLUNG AUS ELEKTROCHEMISCHER SICHT

$$\Delta Q_{u.H.} = 1.25 \text{ eV} / H\text{-ATOM}$$



OFFENES, REAKTIVES SYSTEM ($\Rightarrow$ DAMIT WIRD

GIBB-POTENTIAL ALS
RELEVANTE GRÖßE



a) CHEMISCHE MASSENBILANZ

$$\sum_i \dot{m}_i R_i = \sum_j \dot{m}_j P_j$$

b) Bilanz der chem. Reaktionen

$$\sum_i \dot{m}_i R_i \rightarrow \sum_j \dot{m}_j P_j + \Delta A_{el} + \Delta A_{mech.} + \Delta Q^* \text{ zugeführte Wärme}$$

$\downarrow$
 $= -\Delta Q$ in chemischer Schreibweise

zu MECHAN. ARBEIT $\Delta A_{mech.}$

$$\Delta A_{mech.} = - \sum_i p_i \Delta V_i + \sum_j p_j \Delta V_j \quad \text{UND MIT } p_i = p_j = p \text{ DIE DRÜCKE GLEICH DEM DRUCK DES SYSTEMS}$$

$$\Delta A_{mech.} = - \sum_n p \cdot \Delta V_n \cdot n_n$$

$\uparrow$ ZUMOLZAHLEN
MOLVOLUMEN
FÜR ZUGEFÜHRTE SPECIES GESCHRIEBEN

MIT 1. HAUPTSATZ: $-\Delta Q = \Delta U_{sys.} - \sum_n p \cdot n_n \cdot \Delta V_n + \Delta A_{el}$

$$\Rightarrow 2F \cdot \Delta \varphi = \Delta A_{elekt.}$$

$$2F \cdot \Delta \varphi = -\Delta Q + \sum_n n_n \cdot \Delta U_n + \sum_n p \cdot n_n \cdot \Delta V_n$$

$\uparrow$
AUF ZUGEFÜHRTE SPECIES BEZOGEN

$2F$ - FARADAY-KONSTANTE
 2 - ZAHLE DER ELE-MENTARLAD. PRO SPECIES
 $\Delta \varphi$ - POTENTIAL-DIFF. = SPANNUNG

MESSAGE DES 2. HAUPTSATZES:

FALLS IRREVERS.

$$\frac{\Delta Q_{rev}}{T} = \Delta S$$

ODER $\frac{\Delta Q_{rev}}{T} + \frac{\Delta Q_{irrev}}{T} > \Delta S$

DAMIT: $\Delta Q \geq \Delta S \cdot T$ UND FOLGEND

$$\Delta A_{el} \leq \sum_n n_n \Delta U_n + \sum_n p \cdot n_n \cdot \Delta V_n - \sum_n n_n \Delta S \cdot T$$

UND WEITER:
$$\Delta A_{El} \leq \sum_n n_n (\Delta u_n + p \Delta v_n - T \cdot \Delta S_n) \quad \left(\text{AUF 1 MOL BEZOGEN!} \right)$$

$$\Delta A_{El} \leq \sum_n n_n (\Delta H - T \cdot \Delta S_n)$$

ΔG_n - GIBBSCHES POTENTIAL

$\Rightarrow$ AUSGABELEISTUNG (ELEKTRISCH)

$\Delta T \leq$ ÄNDERUNG DER GIBBSCHEN POTENTIALS
(SUMME DARÜBER) DER BETEILIGTEN SPECIES (n)

FÜR "BETRIEBS- / RANDBEDINGUNGEN"

$p = \text{konst}$ & $\sum u_n \cdot v_n = 0$ & $\Delta \varphi = 0$ & KEINE SONST. VERLUSTE

WIRD $\eta_{\text{FUEL CELL}} = 1.0$ (100%) *) **)

UMKEHRUNG DER RICHTUNG DER "REAKTION (ABWÄRTS)"
(FAUS AUF BETEIL. ZEIT-UMKEHR-INVARIANT)

IDEALE ELEKTROLYSE

*) IN DER REALEN WELT IST $\eta_{\text{FUEL CELL, TOP}} \approx 0.9 \dots 0.95$!
ERREICHBAR!

**) ZAHLENBEISPIELE FÜR "EINFACHE" BRENNSTOFFZELLEN

1) H_2/O_2 -ZELLE (BACON-CELL)
(Bei $600K \approx 300^\circ C$) $\eta = \frac{\sum T \Delta S_n}{\sum \Delta H_n} \approx 0.20$

2) C/O_2 ZELLE
($1200 \dots 1300K$!) $\eta \approx 1.0$

REALE (ZUSÄTZLICHE) VERLUSTE IN FUEL CELLS

- ABWEICHUNGEN VON OPTIMALER STÖCHIOMETRIE DES ELEKTROLYTEN (DURCH REAKTIONS-PRODUKTE, AUCH ANDERE ALS DIE GEWÜNSCHTEN!)
- "ÜBERSPANNUNGEN" FÜR ZU GROßE ELEKTRODENSTROM-DICHTE (STROMDICHTE > 0 ERFORDERN ZUSÄTZLICHE POTENTIALDIFFERENZEN. IN BRENNSTOFFZELLEN UND ELEKTROLYSE-ZELLEN!) $\rightarrow$ PORÖSE ELEKTRODEN

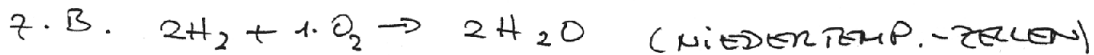
*) IN DER REALEN WELT WIRD

$\eta_{\text{FUEL CELL, TOP}} \approx 0.90 \dots 0.95$!

- ÄNDERUNGEN DER ELEKTRODEN (OBERFLÄCHENMODIFIKATION DURCH CHEM. REAKTIONEN; KORROSION; ELEKTRODENMATERIAL WIRD VERWETZT - GEHT IN LÖSUNG; ...)

6.3 CHARAKTERISTISCHE BEISPIELE / TYPEN VON Brennstoffzellen

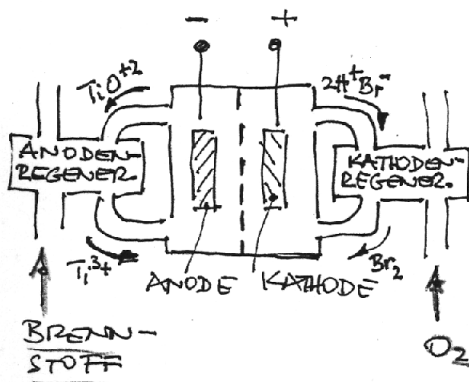
- a) DIREKTE ZELLEN MIT "EINWEG-REAKTIONEN"
DEN REAKTANTEN ZU REAKTIONSPRODUKTEN



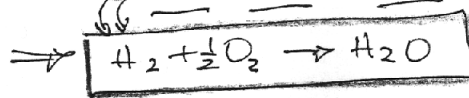
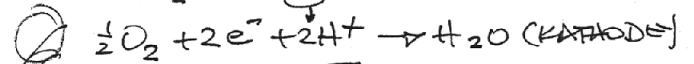
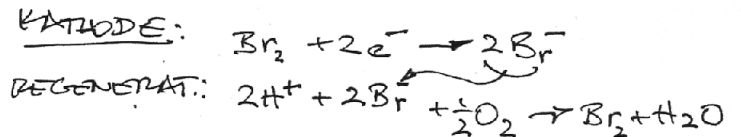
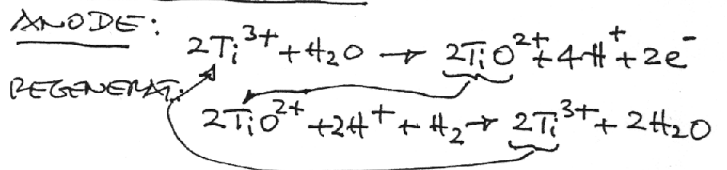
- b) DIREKTE ZELLEN MIT IONENTAUSCHER MEMBRAN
(NUR 1 TYP (POS. ODER NEG.) "IANT" DURCH DIE MEMBRAN; z.B. NUR H^+ -IONEN ...)

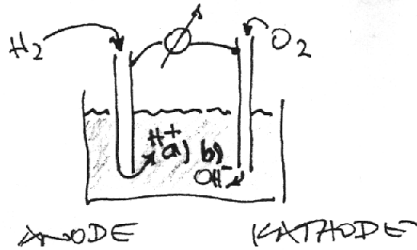
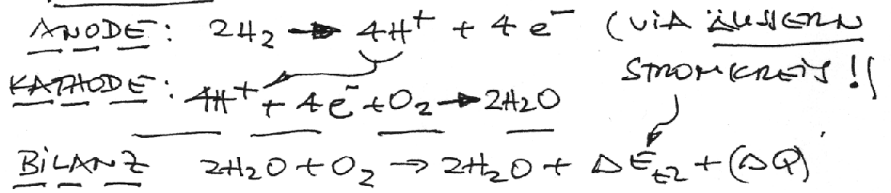
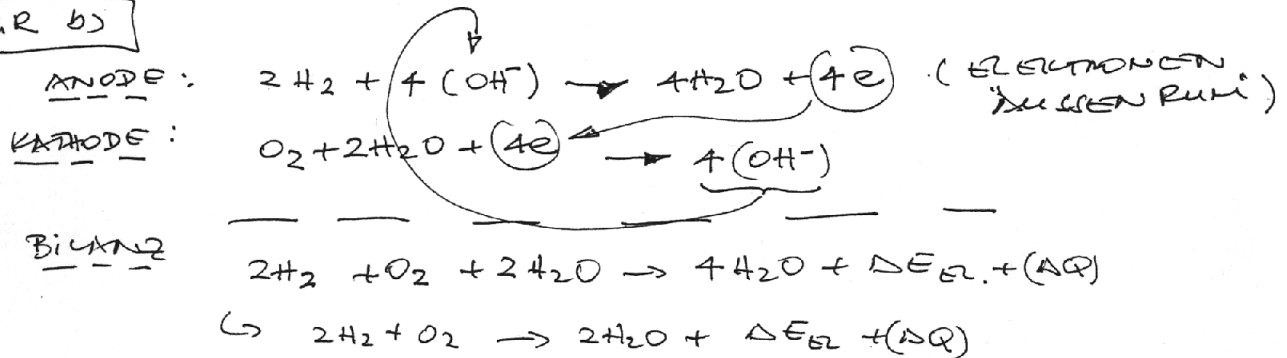
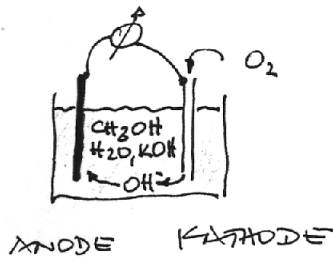
- c) INDIREKTE ZELLEN (REDOX-ZELLEN)

(ZYKLISCHER BETRIEB; P_i UND R_i BLEIBEN IM KREISPROZESS ERHALTEN)

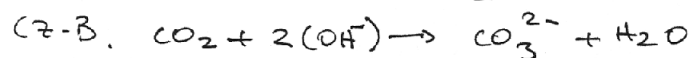
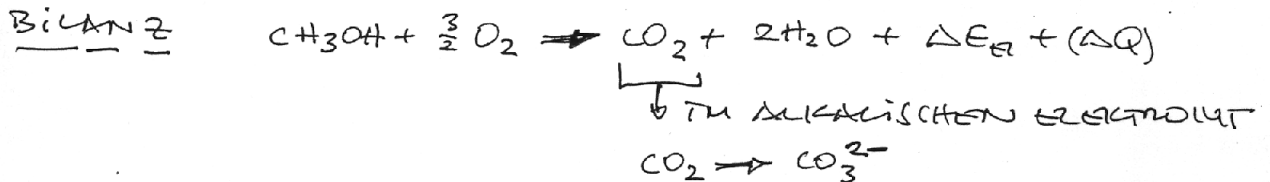
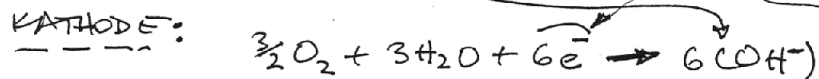
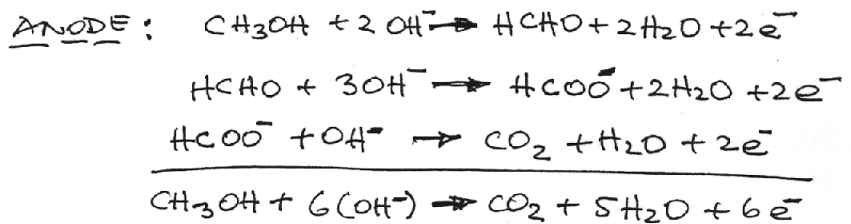


REAKTIONEN AN



a.) WASSERSTOFF-BRENNSTOFFZELLEVERSIONENa) ELEKTROLYT $\rightarrow$ SAUERb) ELEKTROLYT $\rightarrow$ ALKALISCHFÜR a)FÜR b)a.) METHANOL-BRENNSTOFFZELLE

(ALKALISCHER ELEKTROLYT)



$\rightarrow$ FÜHRT ZU (OH^-) -VERARMUNG UND ZUWACHS VON KONZENTR. KARBONAT IONEN, DADURCH LEITFÄHIGKEIT DES ELEKTROLYTEN VERRINGERT $\rightarrow$ INNERWIDERSTAND $\uparrow$ VERLUSTTERMIE $\uparrow$

$$1 \text{ mol } \text{CH}_3\text{OH} \Rightarrow 32 \text{ g}$$

$$\text{mit } 6.03 \times 10^{23} \text{ MOLEKÜLE/mol}$$

mit 6 el. pro METHANOL-MOLEKÜL

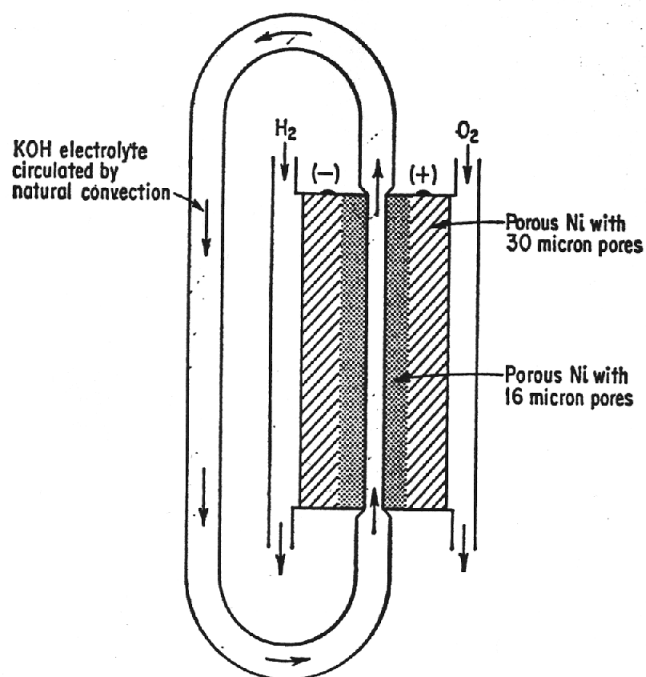
$$\rightarrow 6.03 \times 10^{23} \times 6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ AS} \Rightarrow 6 \times 10^5 \text{ A sec} \mid \text{mol } \text{CH}_3\text{OH}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{160 \text{ Ah!}}}$$

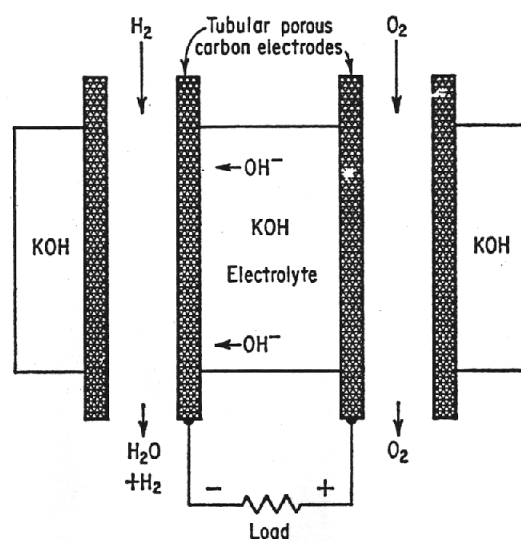
(wie AUTO BATTERIE !!)

BETRIEB mit z.B. 0.5 V und 100 mA

REICHT 1 mol CH_3OH CA 70 TAGE > 2 MONATE!



BACON-CELL (LEESON MOOS LABORATORIES
VERSION).



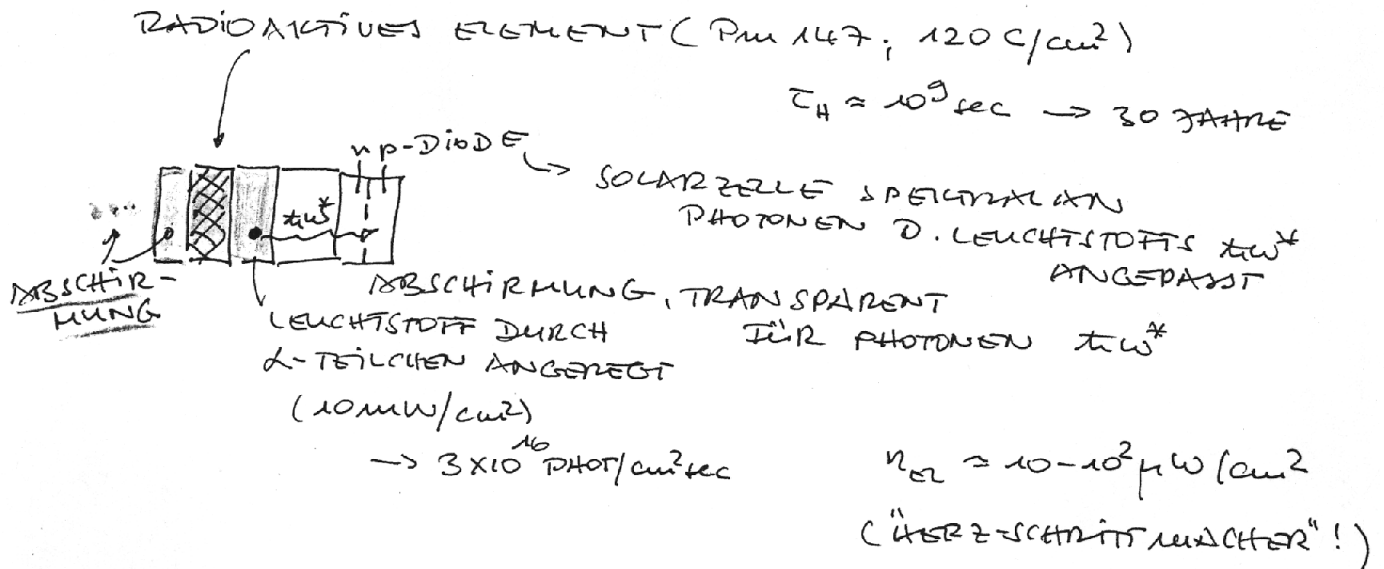
UNION CARBIDE CELL.

AUS S.S.L. CHANG
"ENERGY CONVERSI."
PRENTICE HALL, N.J. 1963

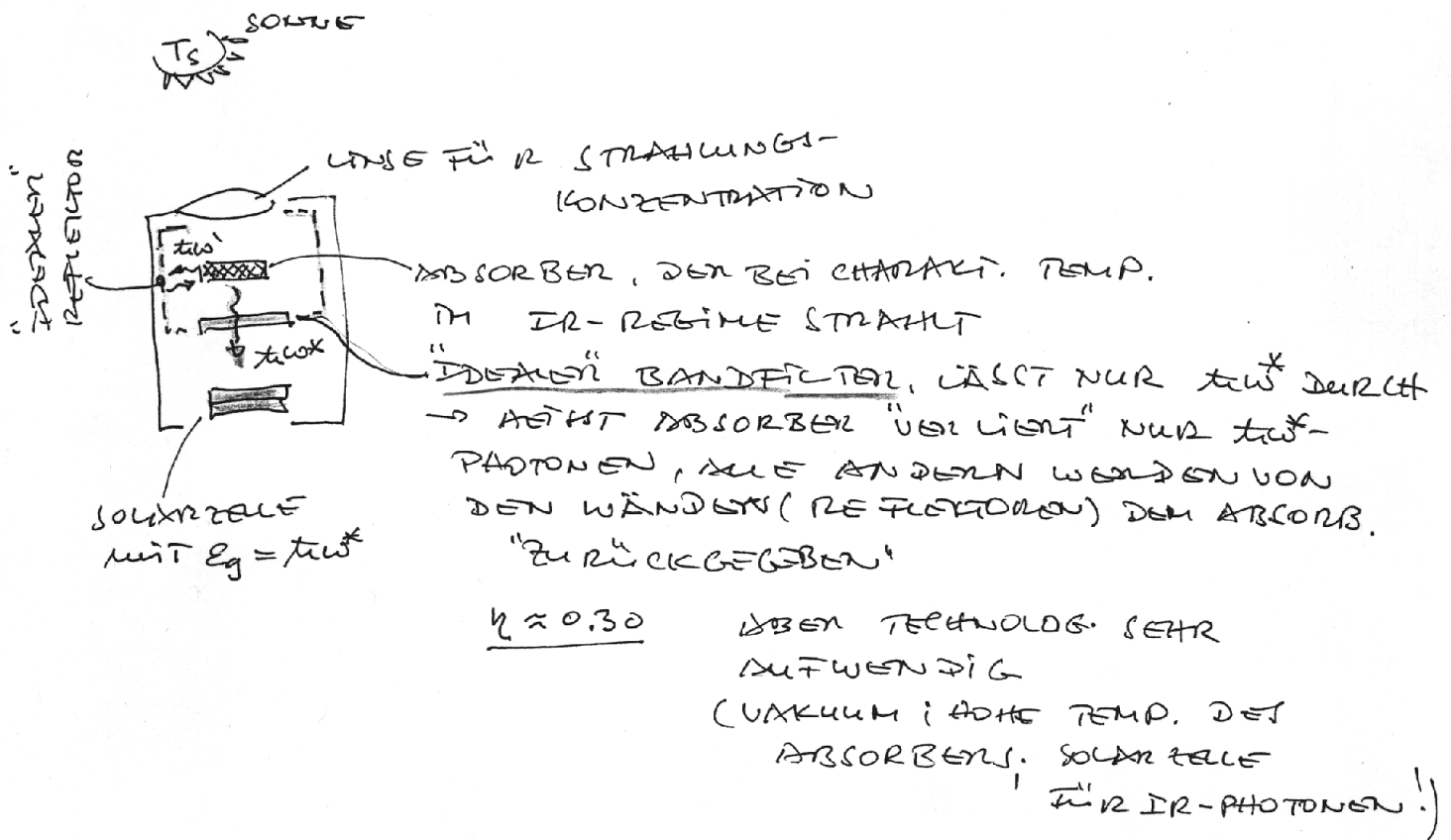
7. WEITERE "EXOTISCHE" WANDLERTYPEN (FÜR SPEZIELLE ANWENDUNGEN)

7-1

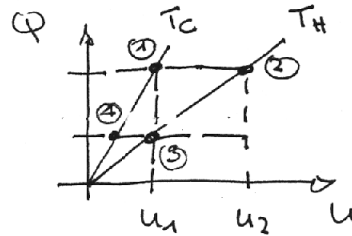
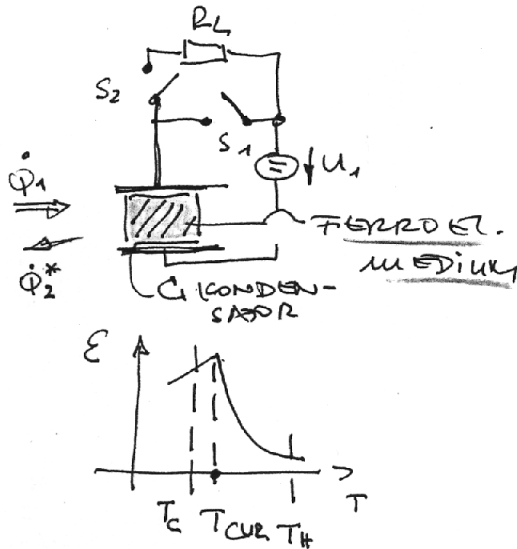
7.1 RADIONUKLEID-BATTERIE



7.2 THERMOPHOTO-ELEMENT



PRINZIP: ÄNDERUNG DER DIELEKTRISCHEN
FUNKTION ϵ MIT VARIATION
DER TEMPERATUR (z.B. BaO_3Ti)
(TEMP IN DER NÄHE DER
CURIE-TEMP.)



① S_2 auf, S_1 zu $\rightarrow C$ bei $T=T_C$ aufladen
 $\rightarrow S_1$ auf!

② $\dot{Q}_1$ zuführen $\rightarrow T_C \rightarrow T_H$ mit Q (Ladung)
konstant ($C = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{d}$) $\rightarrow u = \frac{Q}{C} \rightarrow u \uparrow$
ÄNDERT SICH

③ S_2 zu, $\rightarrow u_2$ treibt Ladung (strom) durch R_L
und lädt Batt. wieder auf.

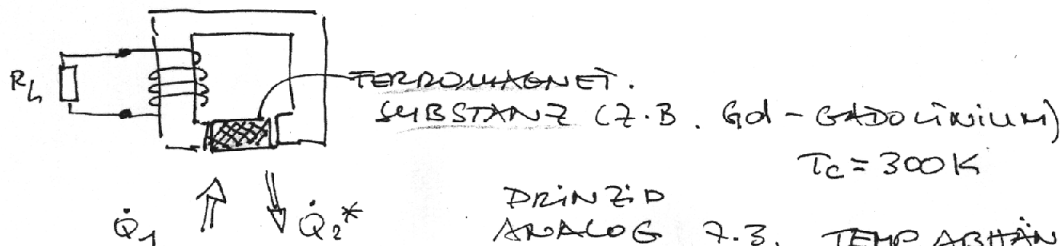
④ S_2 auf, $-\dot{Q}_2^*$ zuführen (Abkühl abführen)
 $C \uparrow, \epsilon \uparrow \rightarrow u \downarrow$ bei gleicher Ladung

⑤ S_1 zu ... zu ① zurück

$$\Delta A_{\text{auf-}} = \int_2^3 Q du; \Delta A_{\text{BATT}} = \int_4^1 Q du \rightarrow \Delta A_{\text{NETTO}} = \underbrace{\Delta A}_{\text{auf.}} + \underbrace{\Delta A_{\text{BATT}}}_{\text{BATT}}$$

20 < 0

7.4 THERMO-FERROMAGNET. GENERATOR



PRINZIP
ANALOG 7.3. TEMP. ABHÄNGIGKEIT
DER MAGNET. SUSCEPTIBILITÄT
 $\Rightarrow$ ÄNDERUNG DES MAGNET. FUNKT.
DURCH SPULE $\rightarrow$ INDUZ. SPANNUNG