

Aus der beliebten Serie „Pleiten, Pech und Pannen“:

AENEAS

Aluminum-based **E**xtrême-field **N**ormal-conducting **E**lectron **A**ccelerating **S**tructure

*Über einen plötzlichen Heldentod
durch Erkrankung am anomalen
Skineffekt...*

Aeneas' Traum

Verantwortlich für die Erfindung dieses Unsinns: *Wolfgang Hillert*

Aus der beliebten Serie „Pleiten, Pech und Pannen“:

AENEAS

Aluminum-based **E**xtrême-field **N**ormal-conducting **E**lectron **A**ccelerating **S**tructure

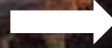
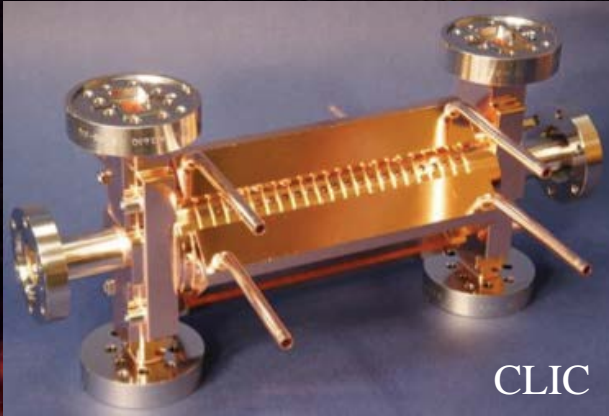
Inhalt:

- TW und SW Linac-Strukturen
- Reinstaluminium bei tiefen Temperaturen
- Ansätze für einen Reinstalu-Linac
- Erste Messungen
- Klärung und Ernüchterung

Aeneas' Traum

Verantwortlich für die Erfindung dieses Unsinns: *Wolfgang Hillert*

Über TW und SW Linac-Strukturen

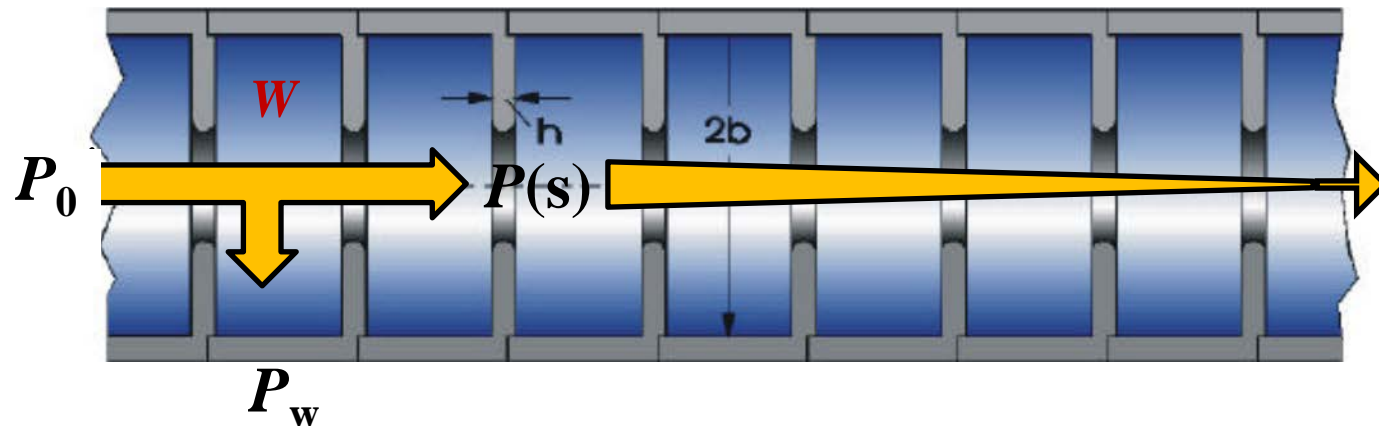


... ?

$$E_{\parallel} = \sqrt{\frac{r_s \cdot \omega}{Q} \cdot \frac{P(s)}{v_g}}$$

$$E_{\parallel} = \sqrt{2 \cdot r_s \cdot \frac{P}{L}}$$

Laufende Wellen im Runzelrohr



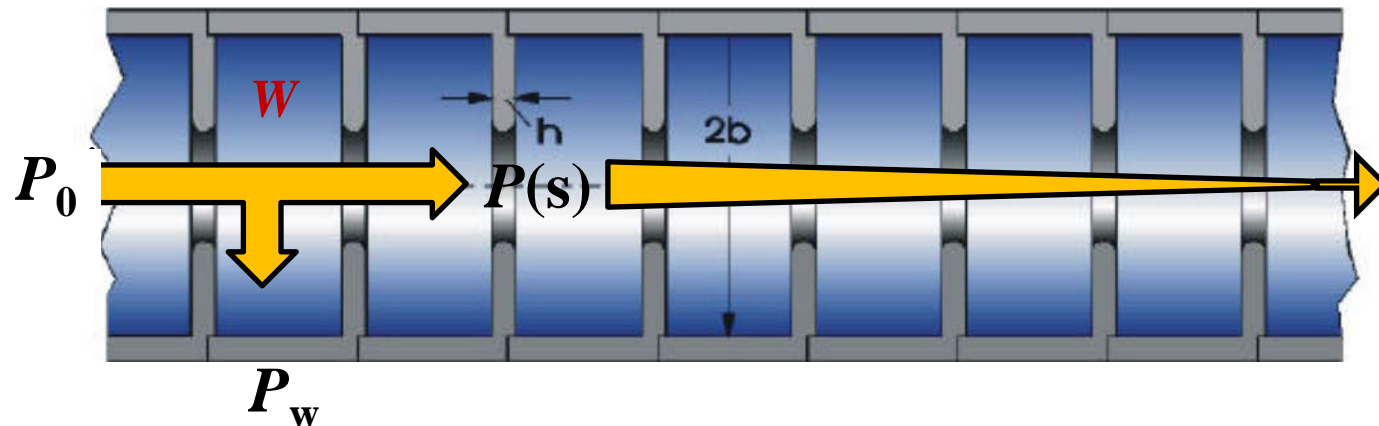
Energy diffusion equation:

$$\cancel{\frac{\partial W}{\partial t}} + \frac{\partial P}{\partial s} + P_w + \cancel{I_b E_{\parallel}} = 0$$

where:

W	=	stored energy per unit length,
P	=	energy flux along s ,
P_w	=	wall losses per unit length,
$I_b E_{\parallel}$	=	energy transferred to the beam.

Laufende Wellen im Runzelrohr



Zusammenhang:

$$Q = \frac{\omega W}{P_w}, \quad P_w = \frac{\hat{E}_{\parallel}^2}{r_s}$$

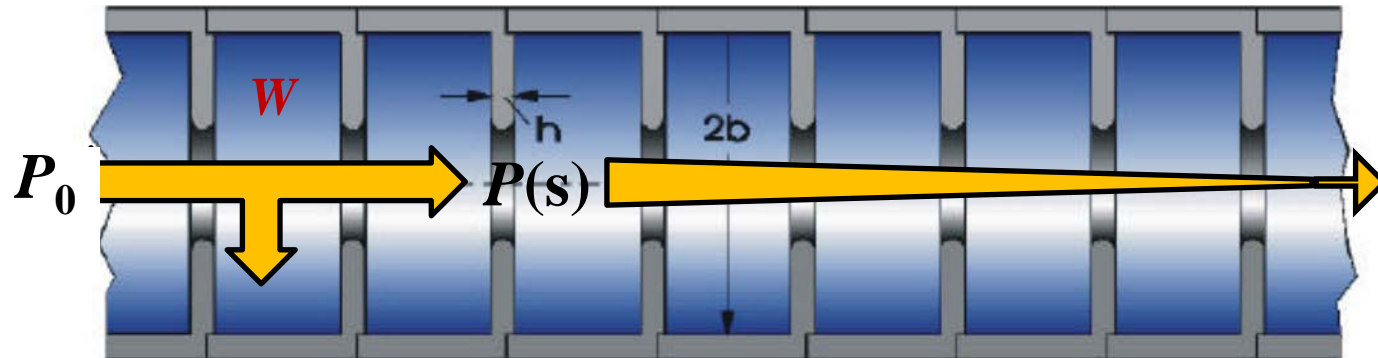
Energiefluss durch Struktur, Dämpfungslänge:

$$P = v_g \cdot W \quad l_0 = \frac{2v_g Q}{\omega}$$

Energiedissipation:

$$P_w = \frac{\omega}{v_g Q} \cdot W \cdot v_g = \frac{\omega}{v_g Q} \cdot P = \frac{2}{l_0} \cdot P$$

Laufende Wellen im Runzelrohr



Bsp.: $E=100\text{MV/m}$, $\omega=2\pi\cdot 12\text{GHz}$, $P=68\text{MW}$ $\rightarrow v_g \approx 0.015\cdot c$!!!

Energy diffusion equation:

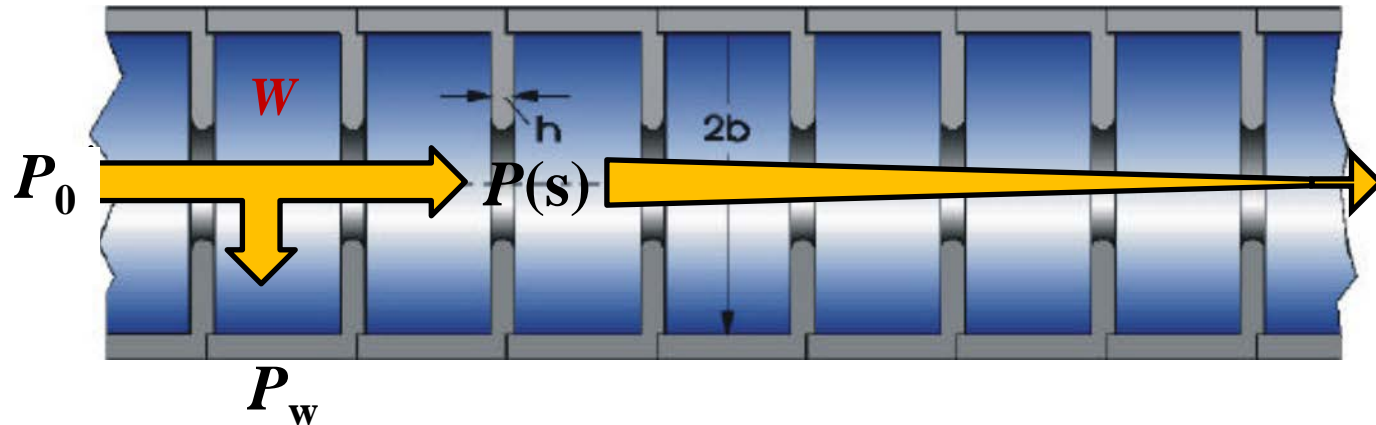
$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial s} + P_w + I_b E_{\parallel} = 0$$

$$r_s = \frac{\hat{E}_{\parallel}^2}{P_w} = \frac{l_0 \hat{E}_{\parallel}^2}{2P}$$

$$E_{\parallel} = \hat{E}_{\parallel} \cdot \cos\psi = \sqrt{\frac{2r_s}{l_0}} P = \sqrt{\frac{r_s}{Q} \cdot \frac{\omega}{v_g} \cdot P(s)}$$

Feldstärke E_{\parallel} hängt nicht primär von elektrischen Eigenschaften ab!!!

Constant Gradient Structure:

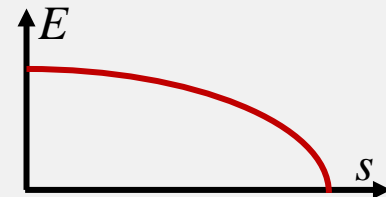


Energy diffusion equation with beam loading:

$$\cancel{\frac{\partial W}{\partial t}} + \frac{\partial P}{\partial s} + P_w + I_b E_{\parallel} = 0$$

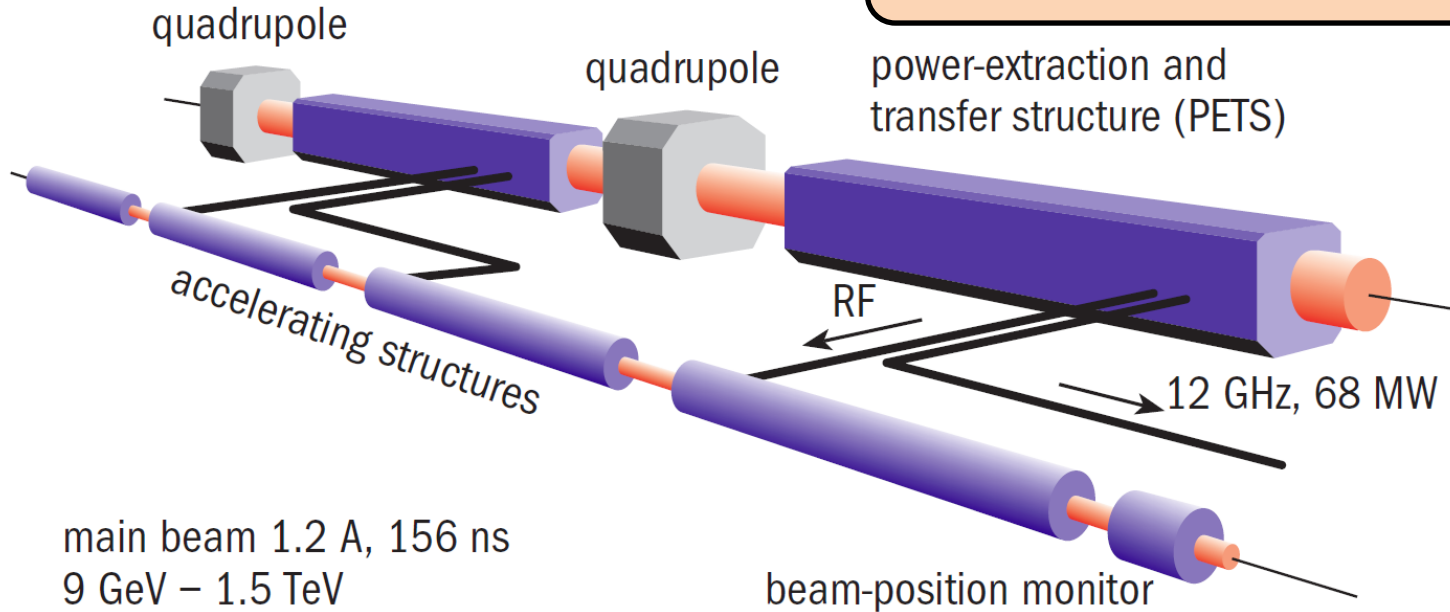
Nach länglicher Rechnung (vgl. Vorlesungsscript):

$$E_{\parallel}(s) = E_0 + \frac{1}{2} r_s I_b \cdot \ln \left\{ 1 - \frac{s}{L} (1 - e^{-2\tau}) \right\}$$



drive beam 100 A, 239 ns
2.38 GeV – 240 MeV

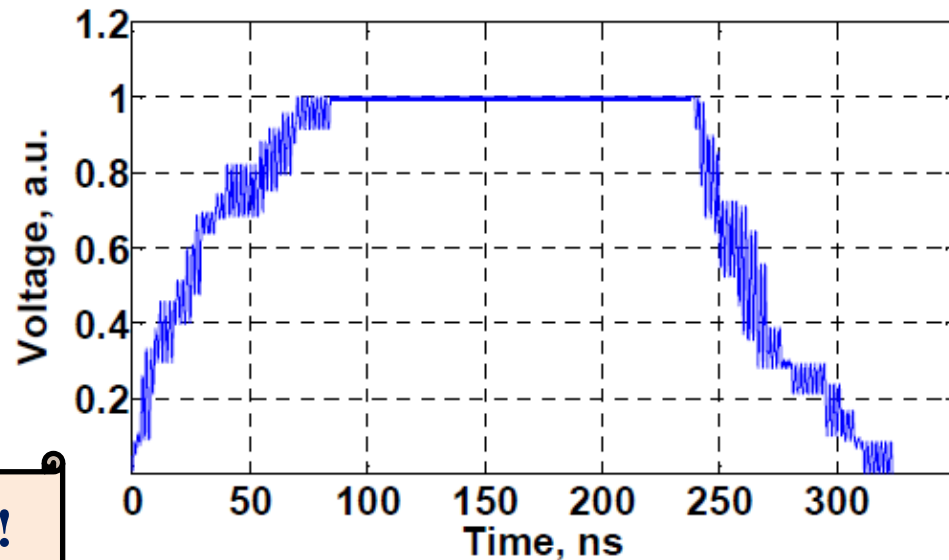
CLIC Schema:



main beam 1.2 A, 156 ns
9 GeV – 1.5 TeV

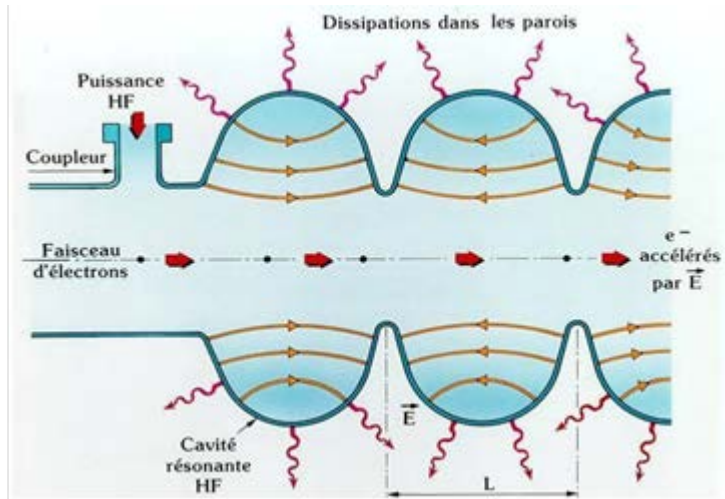
Kompensation des Beam-Loadings:

→ Angepasste RF-Steuerkurve!



Man gewinnt nichts bei Q -Erhöhung!!!

Stehende Wellen im Kühlschrank



Dynamik vollständig durch Strahllast bestimmt:

Optimale Kopplung:

$$\kappa_{opt} = 1 + \frac{P_{beam}}{P_{wall}}$$

„hoffnungslos“ überkritisch gekoppelt!

Vorgehensweise, Sinn und Nutzen:

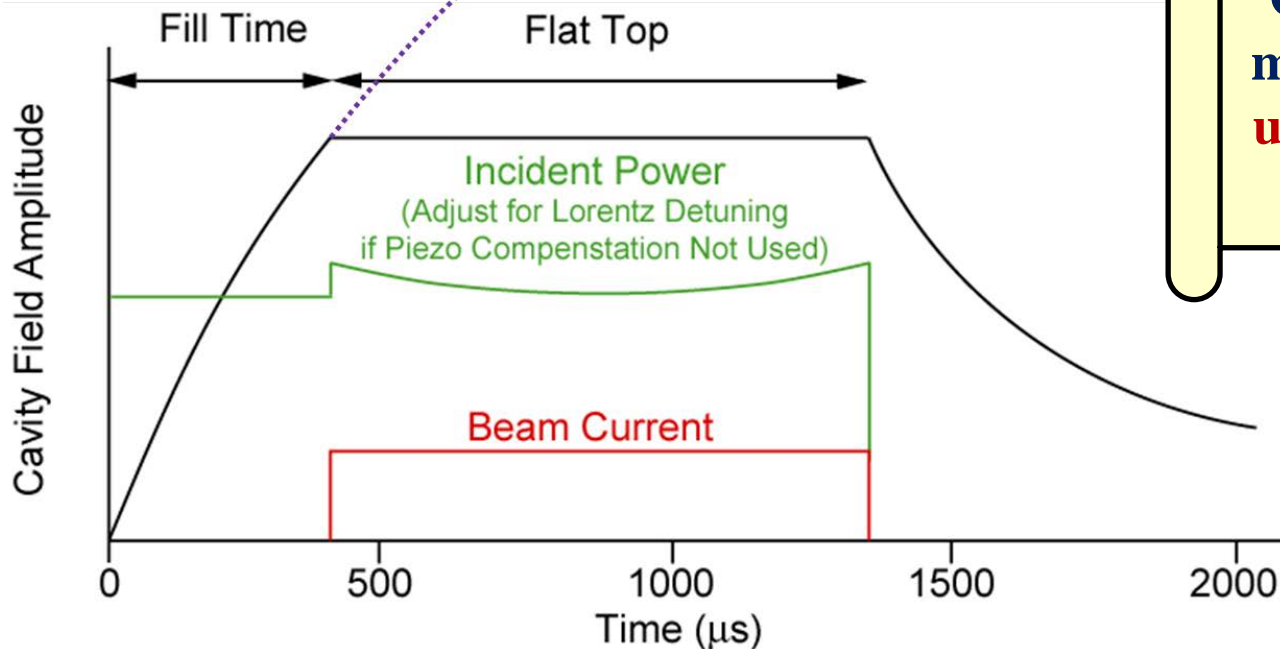
- Typische Kreisgüten $Q \approx 10^{10} \rightarrow$ Resonanzbreite ca. 0,1 Hz!!!
- R_S gibt es gratis, daher Optimierung auf kleine krit. Feldstärken
- Stark überkritische Kopplung bewirkt mehrere pos. Dinge gleichzeitig:
 - breitere Resonanzkurve durch ext. Last / Q_{ext} von typ. $10^5 - 10^6$
 - keinerlei Auswirkung auf Dissipation, da R_S davon unberührt
 - keine Reflexion bei Strahlbetrieb mit Designstromstärke
 - Verringerung der Füllzeiten der Strukturen: $\tau = \frac{Q_l}{\omega_0} = \frac{Q_0}{(1 + \kappa)\omega_0}$

Füllzeiten ↔ Pulslängen

Generatorleistung für Felderzeugung:
$$P_{Gen} = \frac{(1+\kappa)^2}{4\kappa} \cdot \frac{U^2}{2R_s} \approx \frac{\kappa}{4} \cdot \frac{U^2}{2R_s}$$

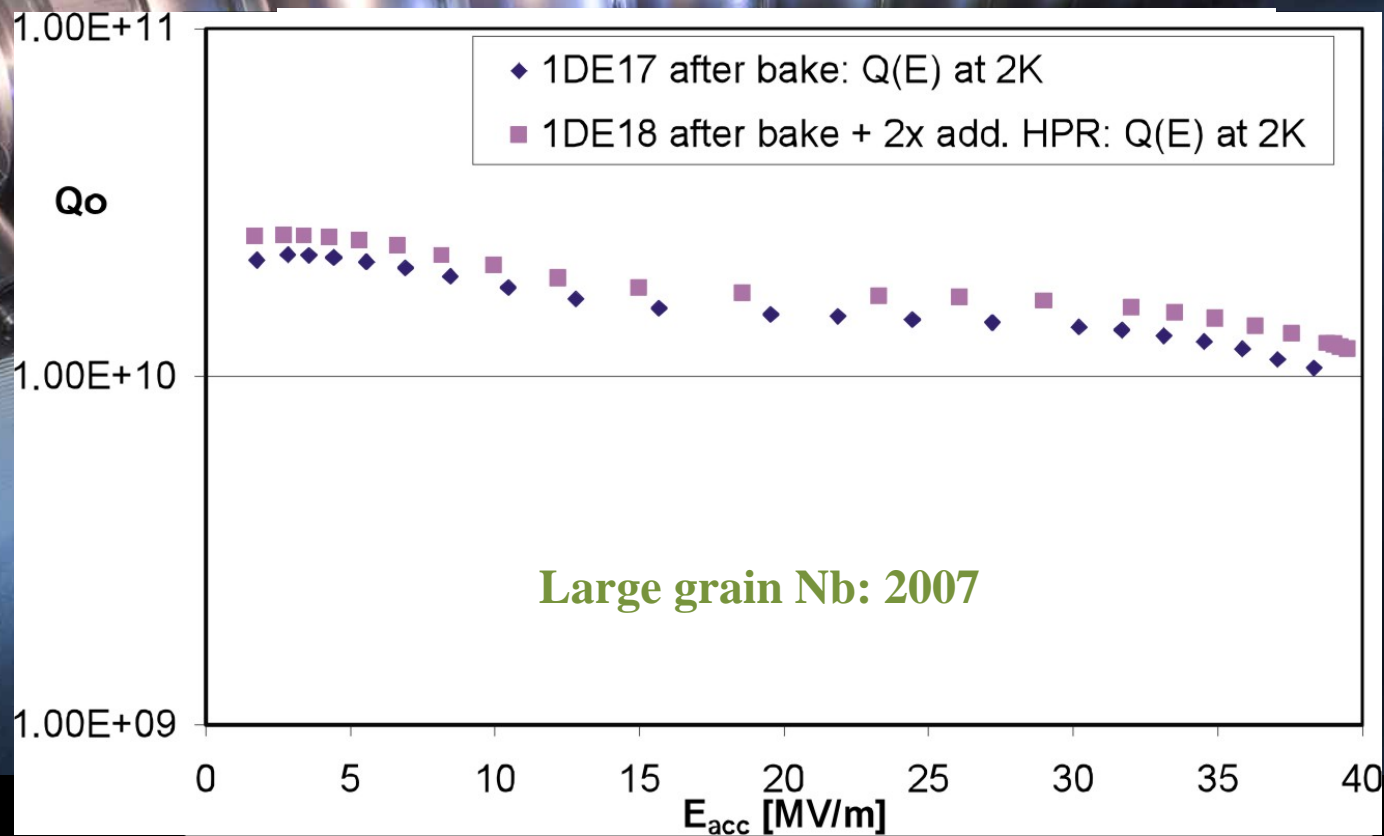
Generatorleistung für Beschleunigung:
$$P_{Gen} \approx U \cdot I_{beam} = \frac{U \cdot I_{beam}}{P_{wall}} \cdot P_{wall} \approx \kappa \cdot \frac{U^2}{2R_s}$$

$$E(t) = E_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{2\tau}}\right), \quad \tau = \frac{Q}{\omega_0}$$



Generatorleistung muss für den Strahl um Faktor 4 erhöht werden!!

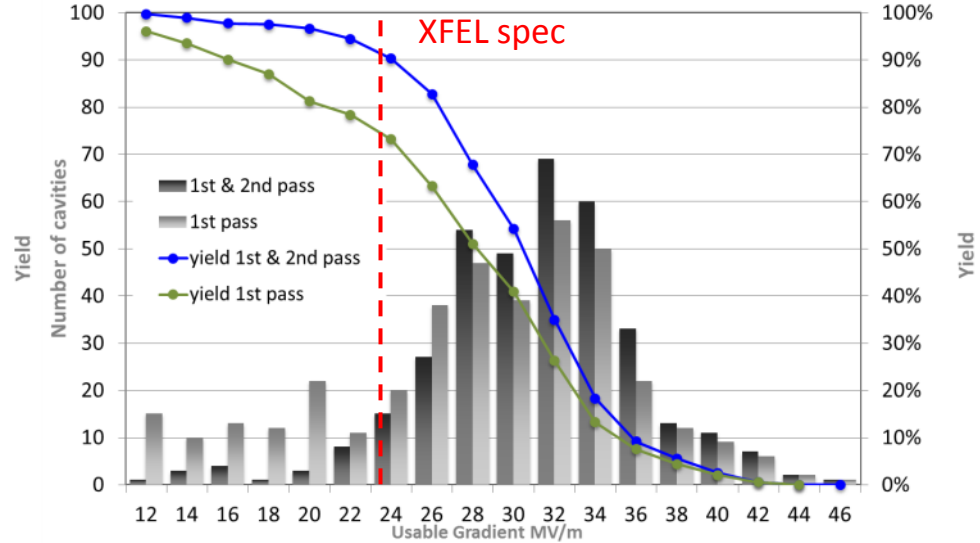
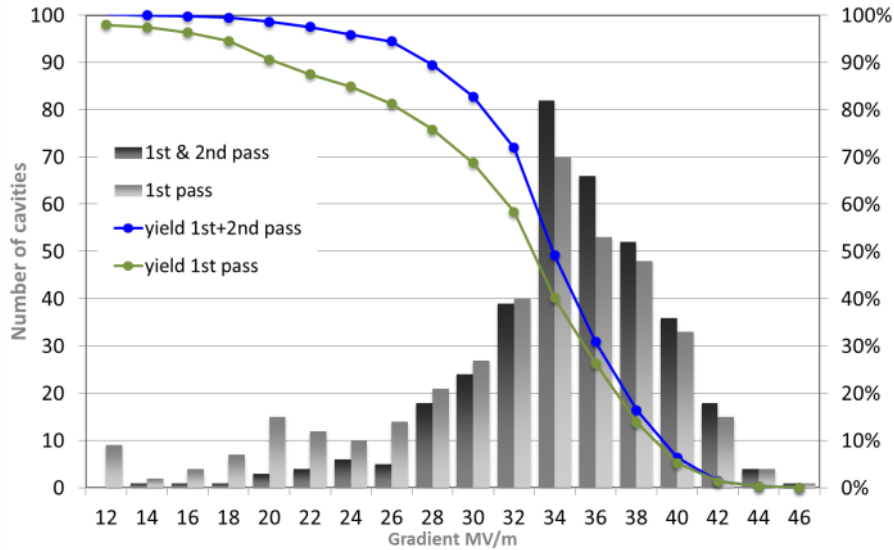
Achievment of high gradients:



High gradient performance of s.c. cavities for European XFEL project



Test at DESY



Average maximum gradient:

(33.1 ± 4.8) MV/m

EZ: (31.2 ± 4.9) MV/m

RI: (35.2 ± 4.4) MV/m

Average usable gradient:

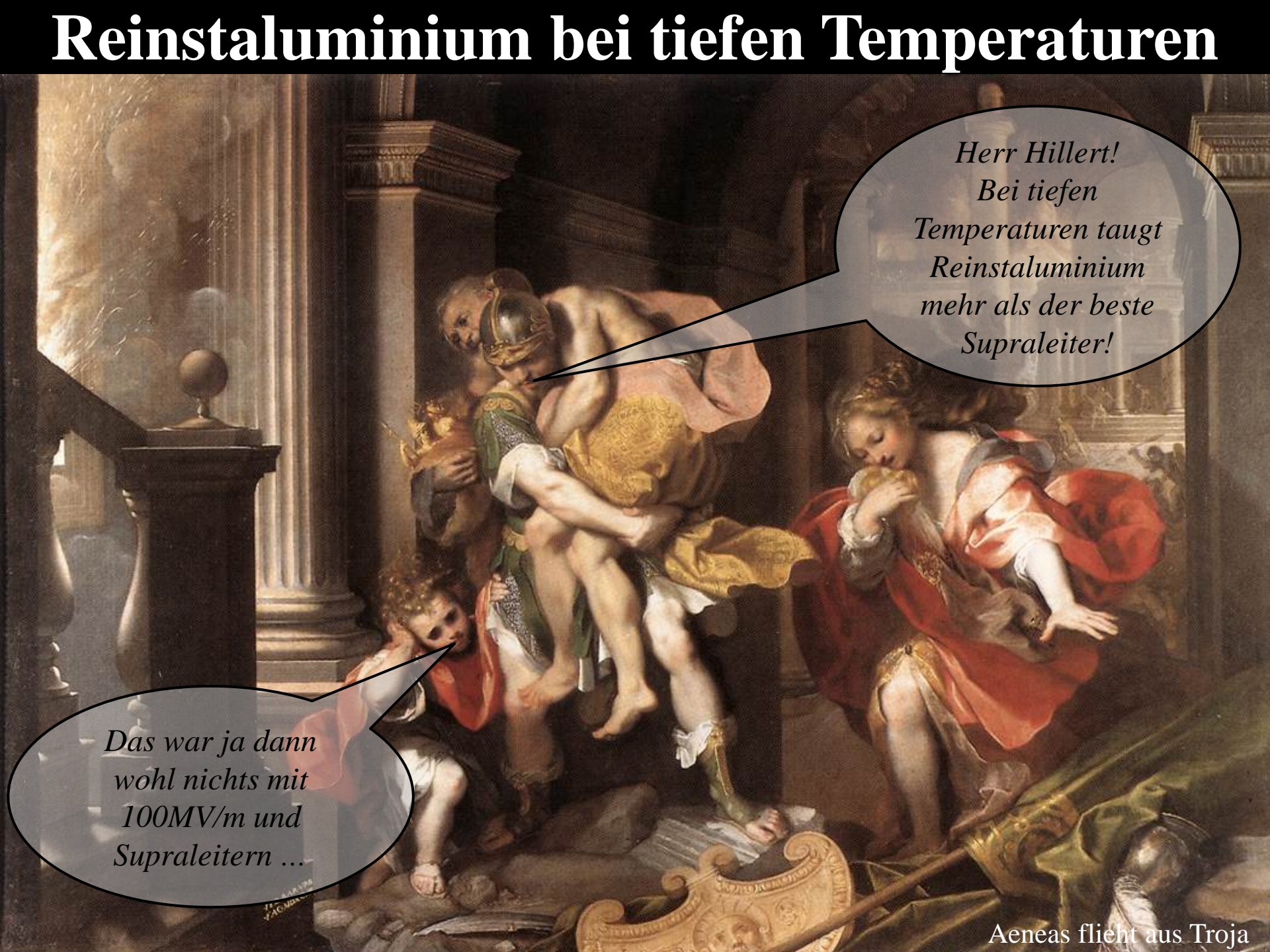
(29.5 ± 5.1) MV/m

EZ: (28.3 ± 4.6) MV/m

RI: (31.0 ± 5.3) MV/m

→ Already close to requirement for ILC

Reinstaluminium bei tiefen Temperaturen



*Herr Hillert!
Bei tiefen
Temperaturen taugt
Reinstaluminium
mehr als der beste
Supraleiter!*

*Das war ja dann
wohl nichts mit
100MV/m und
Supraleitern ...*

Aeneas flieht aus Troja

Die Leitfähigkeit eines freien Elektronengases in einem Phononenbad nach der statistischen Thermodynamik irreversibler Prozesse

VON RUDOLF KLEIN

Aus dem Institut für Theoretische Physik der Technischen Hochschule Braunschweig

(Z. Naturforschg. **18 a**, 1351—1359 [1963]; eingegangen am 3. Oktober 1963)

The formulation of the many-body problem by MARTIN and SCHWINGER is applied to a system of free electrons interacting with a phonon bath. Simplifying the general expression for the wave vector and frequency dependent complex conductivity to the case of a static dc situation the conductivity is expressed in terms of the LAPLACE transform of an appropriate GREEN's function. By means of a simple diagram method a transport equation for this function is derived. In the lowest approximation the solution of this equation gives the BLOCH-GRÜNEISEN law for the conductivity of metals at low temperatures.

In der bekannten Theorie der elektrischen Leitfähigkeit in Metallen benutzt man die BOLTZMANN-Gleichung. Die Herleitung dieser Gleichung enthält wichtige Annahmen¹, den „Stoßzahlansatz“, bzw. in der quantenmechanischen Behandlung die „repeated random phase approximation“, sowie die Voraussetzung der schwachen Kopplung zwischen Elektronen und Gitter.

Aus diesen Gründen hat man versucht, die elektrische Leitfähigkeit auf andere Weise zu behan-

deln, zum Teil, um zu sehen, in welcher Näherung einer allgemeinen Theorie die früher hergeleiteten Ergebnisse herauskommen, und zum anderen, um neue Ausdrücke für die Leitfähigkeit zu bekommen, die nicht auf den Fall schwacher Kopplung beschränkt sind. Diese enthalten die Kopplungskonstanten in höheren Potenzen. So leiteten KOHN und LUTTINGER² die BOLTZMANN-Gleichung aus der Bewegungsgleichung für die Dichtematrix her und zeigten im Fall elastischer Streuung an Verunreini-

¹ R. E. PEIERLS, The Quantum Theory of Solids, Clarendon Press, Oxford 1955.

² W. KOHN u. J. A. LUTTINGER, Phys. Rev. **108**, 590 [1957].

Aus R. Klein, hintere Seiten:

Dazu tritt noch die Lösung der homogenen Gleichung. Man macht sich leicht klar, daß diese Lösung zur Leitfähigkeit nichts beiträgt, ganz analog zu der Situation bei der Behandlung dieses Problems mit Hilfe einer die BOLTZMANN-Gleichung erfüllenden Verteilungsfunktion.

Damit ist

$$\sigma = \frac{e^2 \beta}{6 m^2} \sum_{\mathbf{p}} p^2 n_{\mathbf{p}} n_{\mathbf{p}}^- \tau(p) + \text{k. k.} \quad (61)$$

Diesen Ausdruck bringt man leicht auf die bekannte Form

$$\sigma = \frac{e^2 n}{m} \tau(p_0), \quad (62)$$

wo p_0 der FERMI-Impuls und n die Anzahl der Elektronen pro cm^3 ist. Dabei macht man Gebrauch von

$$F(p_0) = - \int_0^{\infty} dp \frac{\partial n_p}{\partial p} F(p) = \frac{2 \pi^2 \beta}{m} \sum_{\mathbf{p}} n_{\mathbf{p}} n_{\mathbf{p}}^- \frac{1}{p} F(p), \quad (63)$$

wobei $\partial n_p / \partial p$ in der ersten Gleichung als reine δ -Funktion angesehen wird und $F(p)$ eine stetige Funktion ist. Wir wollen $\tau(p_0)$ berechnen, um das

so entstandenen Gleichung für $1/\tau(p_0)$ werden in Integrale verwandelt. Das Integral über \mathbf{p} ist einfach, da die Faktoren $n_{\mathbf{p}} n_{\mathbf{p}+\mathbf{k}}$ und $n_{\mathbf{p}+\mathbf{k}} n_{\mathbf{p}}$ δ -funktionsartig sind. Das Integral über \mathbf{k} ist unter der Berücksichtigung von $g^2(\mathbf{k}) \sim |\mathbf{k}|$ proportional dem auch bei SOMMERFELD und BETHE¹⁴ auftretenden Integral

$$J_5\left(\frac{\Theta}{T}\right) = \int_0^{\Theta/T} \frac{\eta^5 d\eta}{(e^\eta - 1)(1 - e^{-\eta})}.$$

Auf diese Weise ergibt sich schließlich

$$\tau(p_0) = \frac{9 M N \pi p_0^3 s^6}{m C^2 (k_B T)^5 J_5(\Theta/T)},$$

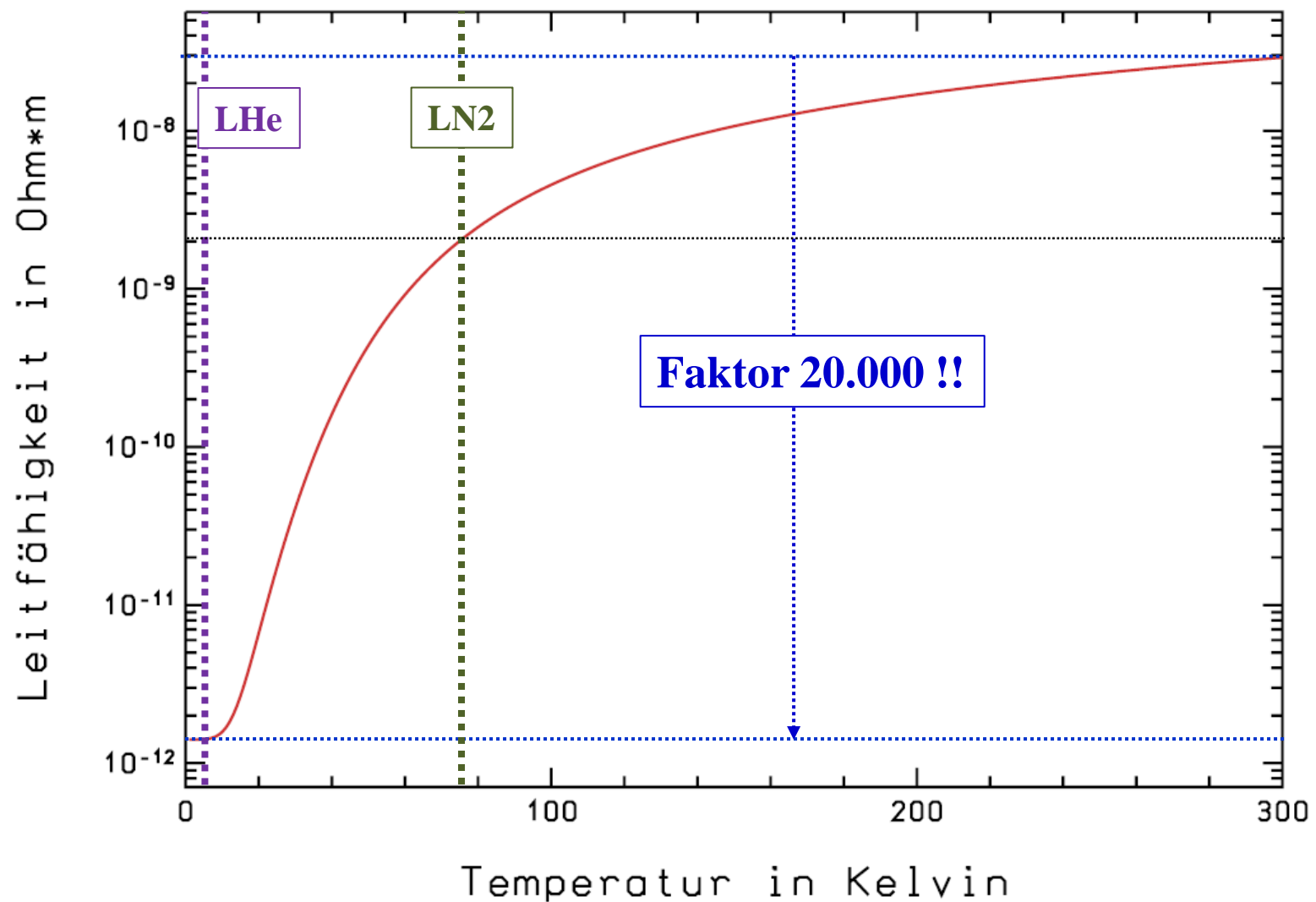
was mit Gl. (62) gerade das BLOCH-GRÜNEISEN-Gesetz darstellt.

Die hier hergeleitete Transportgleichung, die das bekannte Widerstandsverhalten liefert, ist prinzipiell einfach auszudehnen auf den Fall der frequenzabhängigen Leitfähigkeit und andererseits auch auf höhere Näherungen in der Kopplung, wo man also

¹⁴ A. SOMMERFELD u. H. BETHE, Handbuch der Physik, Bd. 24, Teil II, Springer-Verlag, Berlin 1933.

Reinstaluminium gem. Grüneisen-Gesetz

$$\sigma(T) = \sigma(4K) + K_{GE} \cdot \left(\frac{T}{\Theta}\right)^5 \cdot \int_0^{\Theta/T} \frac{t^5 dt}{(e^t - 1)(1 - e^{-t})} \quad \text{mit} \quad K_{GE} = \frac{\sigma(293K)}{\left(\frac{293K}{\Theta}\right)^5} \cdot \int_0^{\Theta/293K} \frac{t^5 dt}{(e^t - 1)(1 - e^{-t})}$$



Ansätze für einen Reinstalu-Linac

*Wie wäre es
denn mit
Seitenkopplung?*

*Das ist ja großer
Mist mit den
Füllzeiten!*

Venus zeigt Aeneas Waffen



PARALLEL COUPLED CAVITY STRUCTURE*

R. M. Sundelin, J. L. Kirchgessner, and M. Tigner
 Laboratory of Nuclear Studies, Cornell University
 Ithaca, New York 14853

Summary

A parallel coupled RF cavity structure which provides favorable solutions to all of the requirements for use in an e^+e^- storage ring is described. Properties of this structure have been determined mathematically and through measurements on S-band models. An L-band prototype is being constructed and will be tested at high power.

Introduction

An RF cavity structure suitable for use in Cornell's proposed CESR e^+e^- storage ring must satisfy a number of requirements. These are summarized in Table I.

TABLE I STRUCTURE REQUIREMENTS

- Operate at 500 MHz
- Maximize shunt impedance in the available space (four spaces, 6 meters each)
- Minimize number of separately powered modules
- Avoid passband mode overlap
- Minimize sensitivity of amplitude and phase to individual cell frequency errors
- Obtain intrinsic thermal stability
- Provide adequate cooling
- Provide simple means for tuning the structure to compensate for loading by the beam
- Provide sufficient loading of all important TM_0 and TM_1 modes to prevent cavity-induced instabilities

shows the equivalent circuit of the structure. All cells, shown as R, L, and C, are effectively in series with the coupling line at half-wavelength intervals. The coupling iris adds an effective inductance L' in series with each cell.

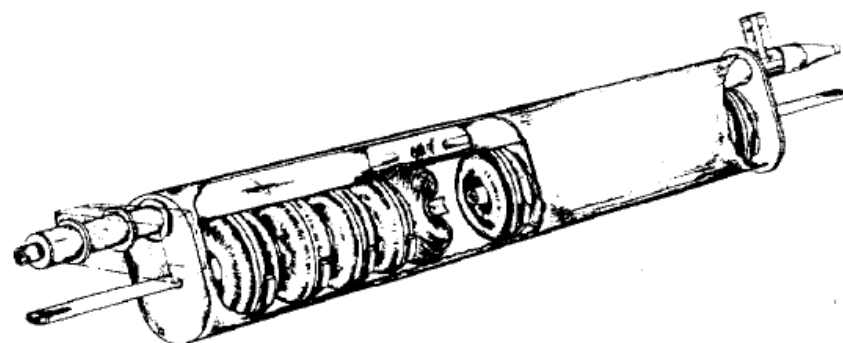
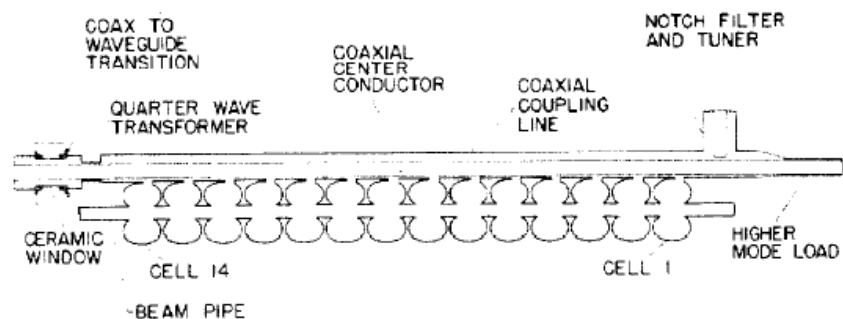


Fig. 1. Parallel coupled cavity structure, including water tank used for cooling.



PARALLEL-COUPLED ACCELERATING STRUCTURES

O. N. Brezhnev, P. V. Logatchev, V. M. Pavlov, O. V. Pirogov, S. V. Shiyankov,
BINP, Novosibirsk, Russia

Ju. D. Chernousov, V. I. Ivannikov, I. V. Shebolaev,
Institute of Chemical Kinetic and Combustion, Novosibirsk, Russia

LINAC'02

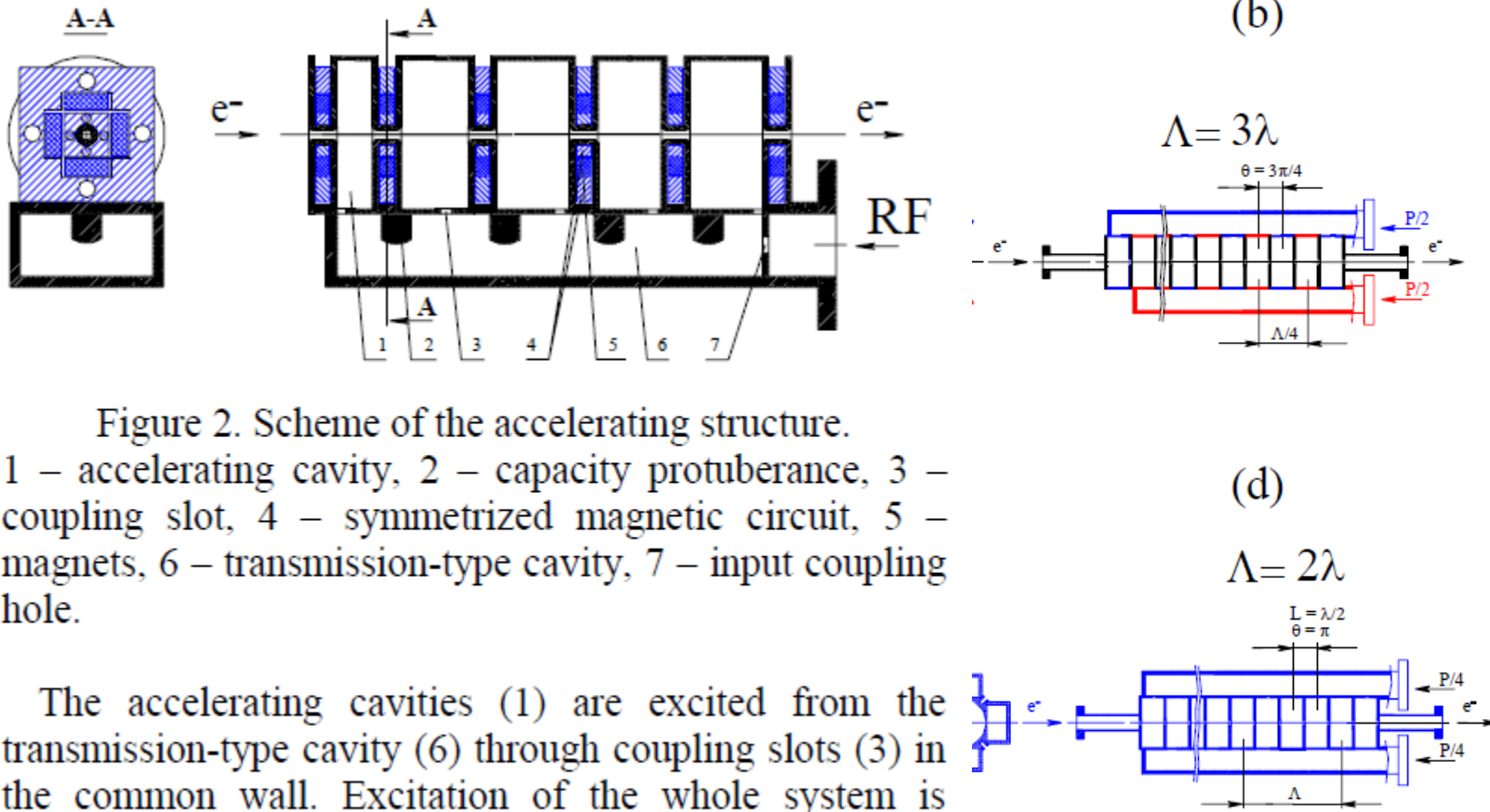


Figure 2. Scheme of the accelerating structure.

1 – accelerating cavity, 2 – capacity protuberance, 3 – coupling slot, 4 – symmetrized magnetic circuit, 5 – magnets, 6 – transmission-type cavity, 7 – input coupling hole.

The accelerating cavities (1) are excited from the transmission-type cavity (6) through coupling slots (3) in the common wall. Excitation of the whole system is carried out through a coupling hole (7). The transmission-type cavity (6) represents a cut of the rectangular waveguide, operated on H_{104} -mode. The wave-guide is loaded

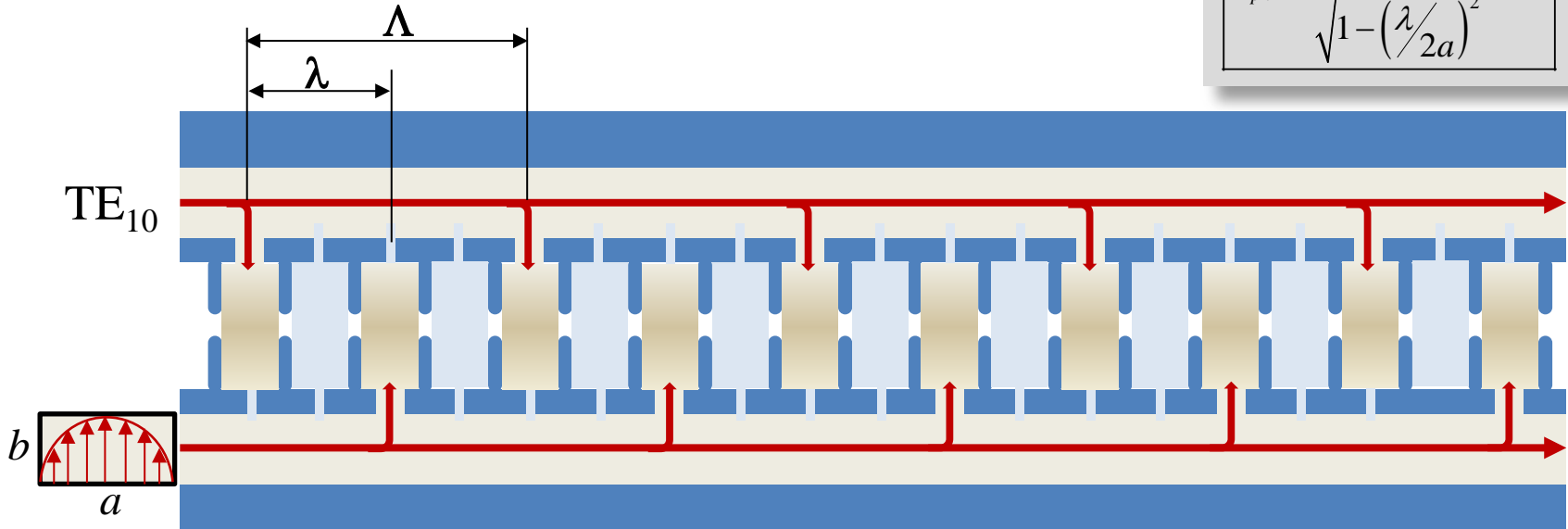
with rectangular feeding waveguides.

AENEAS:

Aluminum-based **E**xtrême-field **N**ormal-conducting **E**lectron **A**ccelerating **S**tructure

Side-Coupled LINAC-Structure:

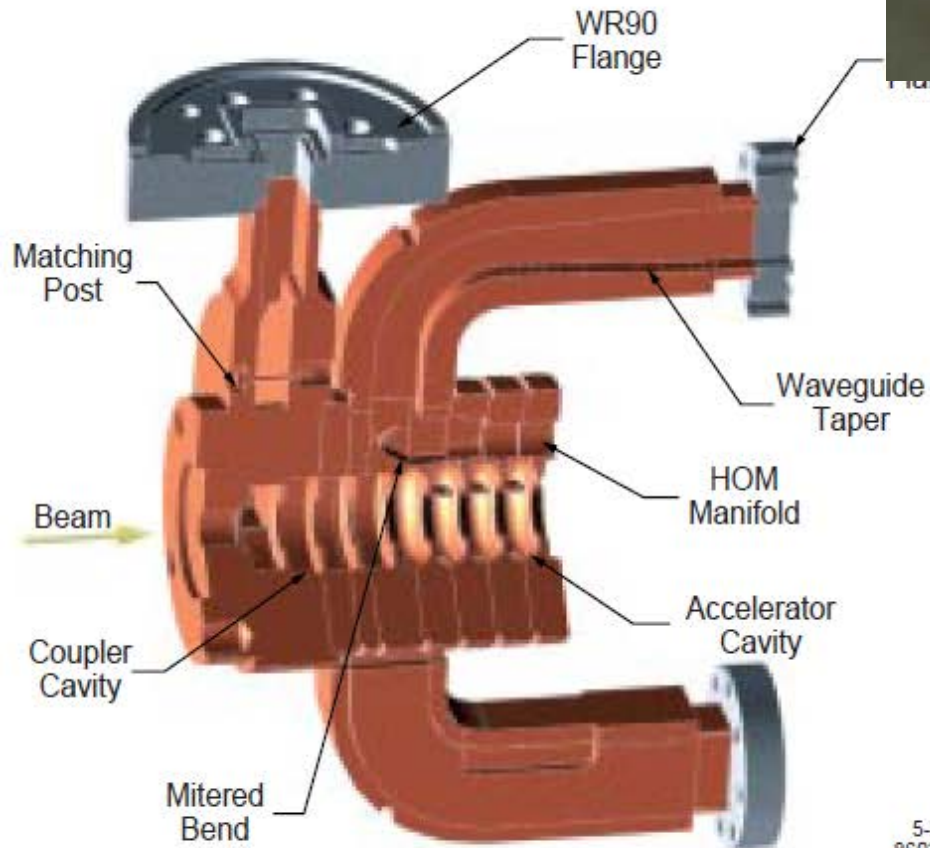
$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} = 2\lambda$$
$$v_{ph} = \frac{c}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}$$



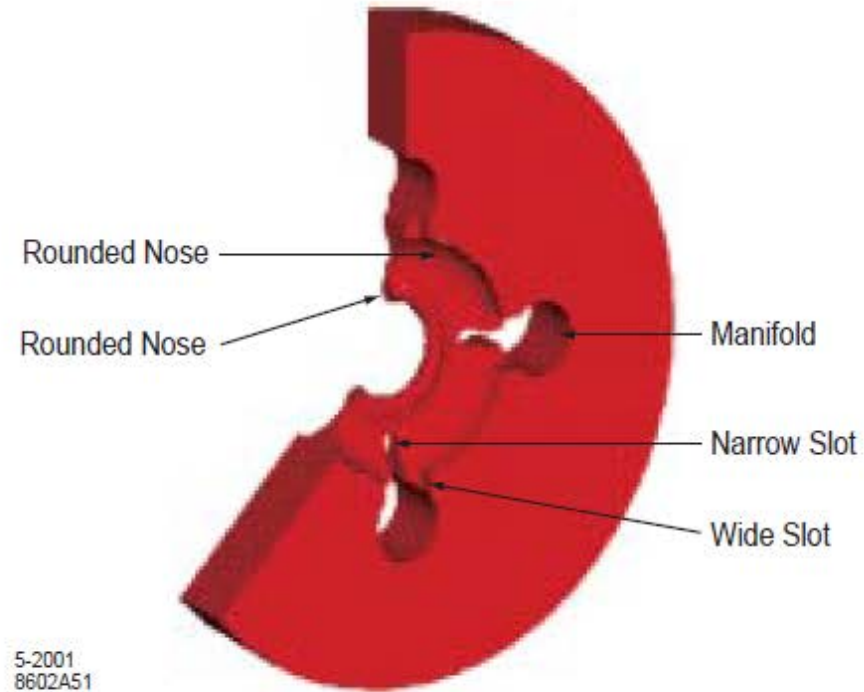
$$\Lambda = 2\lambda \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \sqrt{3} \cdot a, \quad v_{ph} = 2c, \quad v_g = 0.5c, \quad Z = 2Z_{vac}$$

HOM-Kompensation?!

NLC design report 2001:



(a)



(b)

Figure 4.24: Cutaway view of (a) upstream end of RDDS1 and (b) RDDS1 cell.

HOM-Vorwärtsdämpfung

Hohlleiterhöhe b beliebig wählbar für TE_{10} !

Ansatz: Gegenphasige Ankopplung Dipolmode über TM_{11} !

Resonanzfrequenzen: $f_1 = j_1/j_0 \cdot f_0$

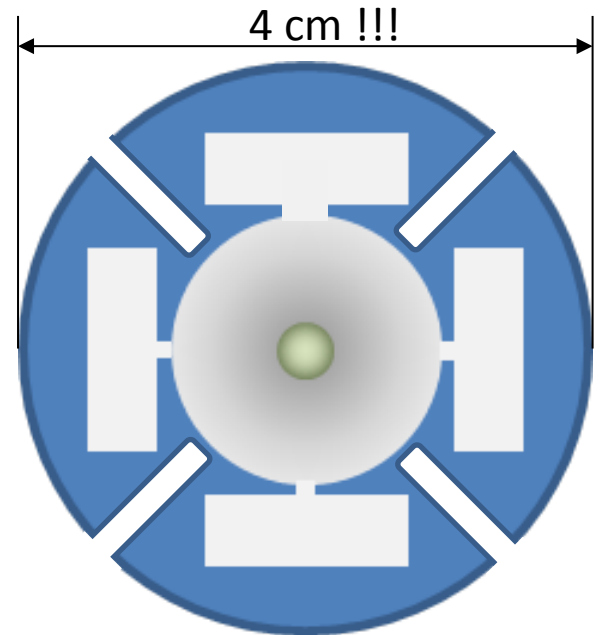
- Grundmode: $k_c r = j_0 = 2,405$
- Dipolmode: $k_c r = j_1 = 3,83$

Auslöschung n Resonatoren später:

$$v_{ph,1} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{j_0}{n \cdot j_1}\right)^2}}, \quad \text{cut-off: } \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}$$

Nach braver Rechnung:

$$\frac{b}{a} = \frac{3}{4} \cdot \left[\frac{2}{n} \cdot \frac{j_1}{j_0} - \frac{1}{n^2} \right]^{-1}$$



$n = 1$:

$$f_1 = 12 \text{ GHz}, \quad f_2 = 19,1 \text{ GHz}, \quad \lambda_0 = 25 \text{ mm}, \quad \lambda_1 = 15,7 \text{ mm}, \\ r = 9,57 \text{ mm}, \quad a = 14,4 \text{ mm}, \quad b = 4,95 \text{ mm}$$

Fertigungstoleranzen / Temperatur

(warum gibt es bisher keine seitengekoppelte SW-Strukturen?)

Toleranzen:

a) Stehwellenresonatoren:

$$\frac{\omega}{c}r = j_0, \quad \tan \varphi = Q_0 \cdot \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right), \quad \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{r_0}{r} \Rightarrow \Delta\varphi = 2Q \cdot \frac{\Delta r}{r_0} \cdot \left\{ 1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta r}{r_0} \right)^2 \right\}^{-1}$$

für $Q \approx 10^4$ ergibt sich:

$\Delta r/r$	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
$\Delta\varphi / \text{deg}$	$1,1^\circ$	11°	29°

12 GHz ($r \approx 10$ mm) → **$\Delta r = 10$ nm!!**

b) Strukturen mit laufenden Wellen:

Phasenvorschub: $\varphi = 2\pi d/\lambda \rightarrow \Delta\varphi = d \cdot \Delta k$ und $\Delta k = dk/d\omega \cdot \Delta\omega = \Delta\omega/v_g$

Damit

$$\frac{d\varphi}{dr} = \frac{d\omega}{dr} \cdot \frac{d}{v_g}$$

12 GHz, $v_g \approx 0,01$ $d = \lambda/3$

$\Delta r/r \approx 10^{-4} \leftrightarrow \Delta\varphi \approx 1^\circ$

$\Delta r = 1$ μm

Fertigungstoleranzen / Temperatur

(warum gibt es bisher keine seitengekoppelte SW-Strukturen?)

Temperatur:

Für CLIC gefordert: $\Delta T < 0,1^\circ\text{C} \leftrightarrow \Delta E/E < 0,05\%$

Bei Temperaturänderungen verschieben sich alle Zellen gleichartig!

Allgemeine Beziehung:

$$\frac{\Delta E}{E} = \tan \varphi \cdot \Delta \varphi + \frac{1}{2} \Delta \varphi^2$$

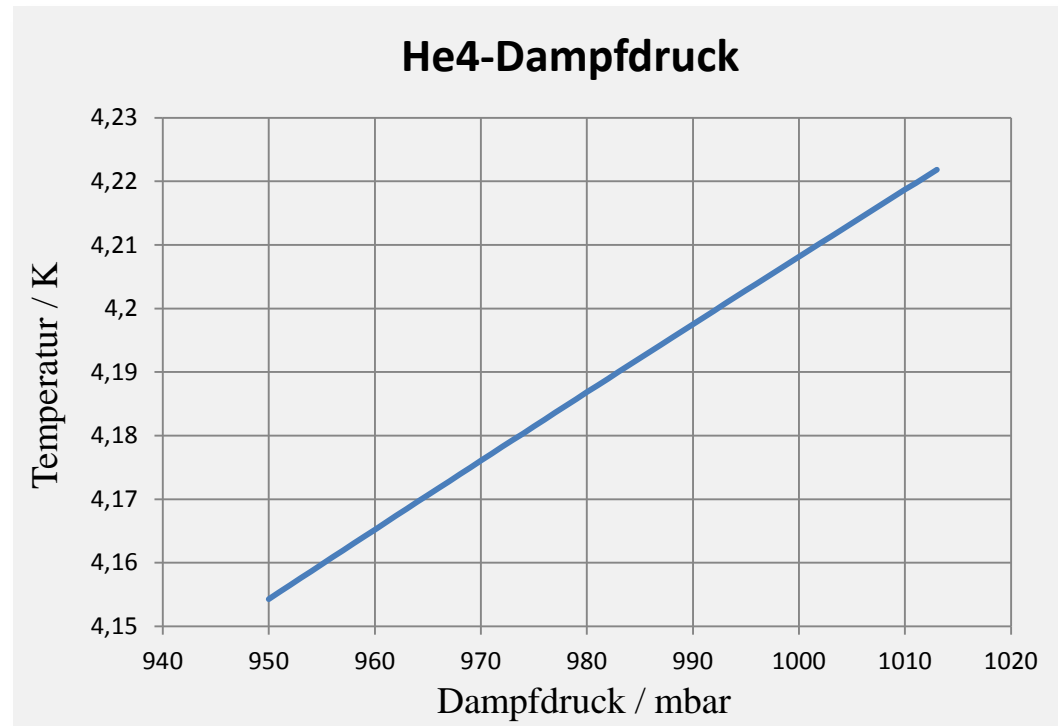
ergibt bei gefordertem $\Delta E/E$

$$\Delta \phi = 1,3^\circ @ \cos(\phi = 0^\circ)$$

$$\Delta \phi = 0,1^\circ @ \cos(\phi = 8^\circ)$$

und bei $\Delta r/r = 2,31 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta T$

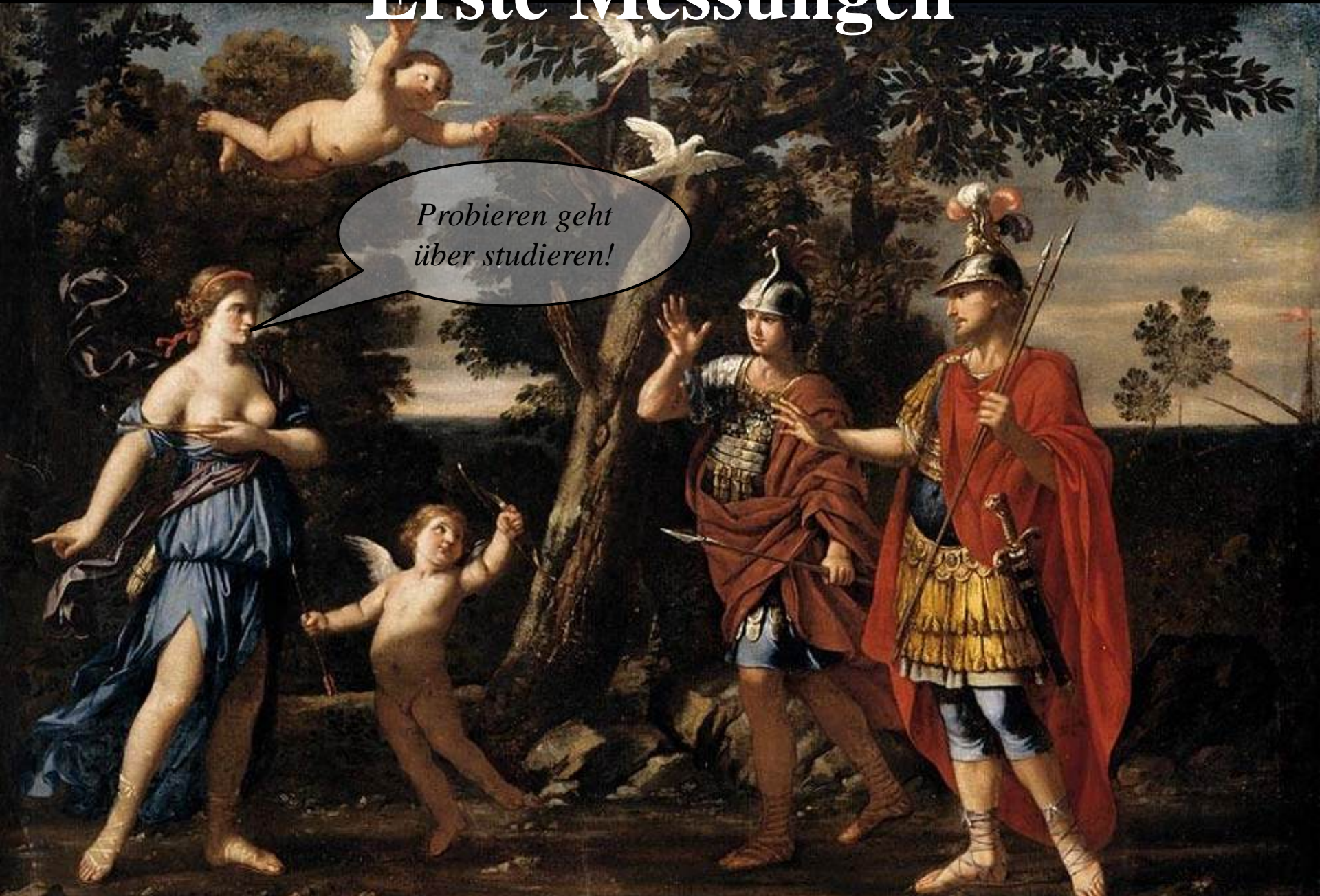
$$\Delta T < 0,005 \text{ K} \leftrightarrow \Delta P < 5 \text{ mbar}$$



Erste Messungen

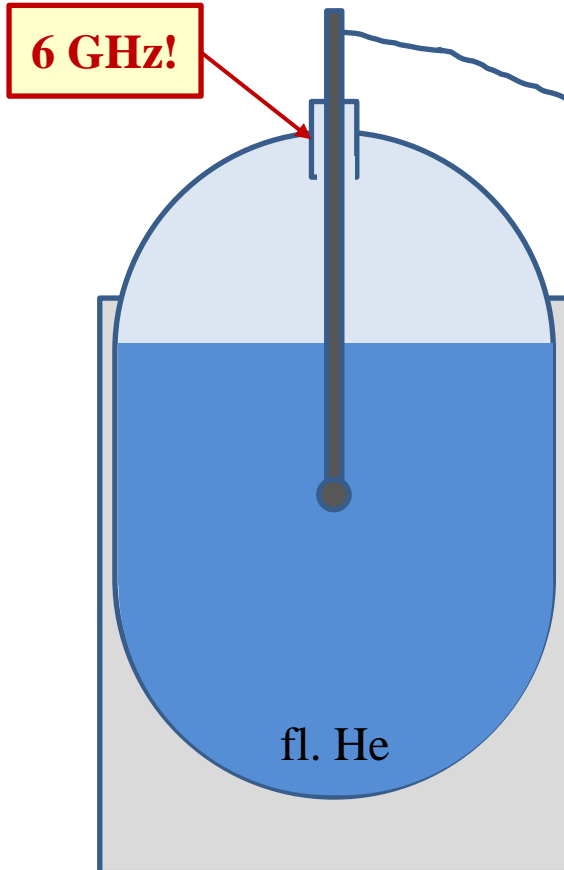
*Probieren geht
über studieren!*

Venus erscheint Aeneas und Achates



Ein einfacher Messaufbau mit „He-Kryostat“

- Lochkopplung des Resonators !
- Hohlleiter mit Coax-Übergängen !



Der Ernüchterung 1. Teil

kritische Ankopplung des Testresonators

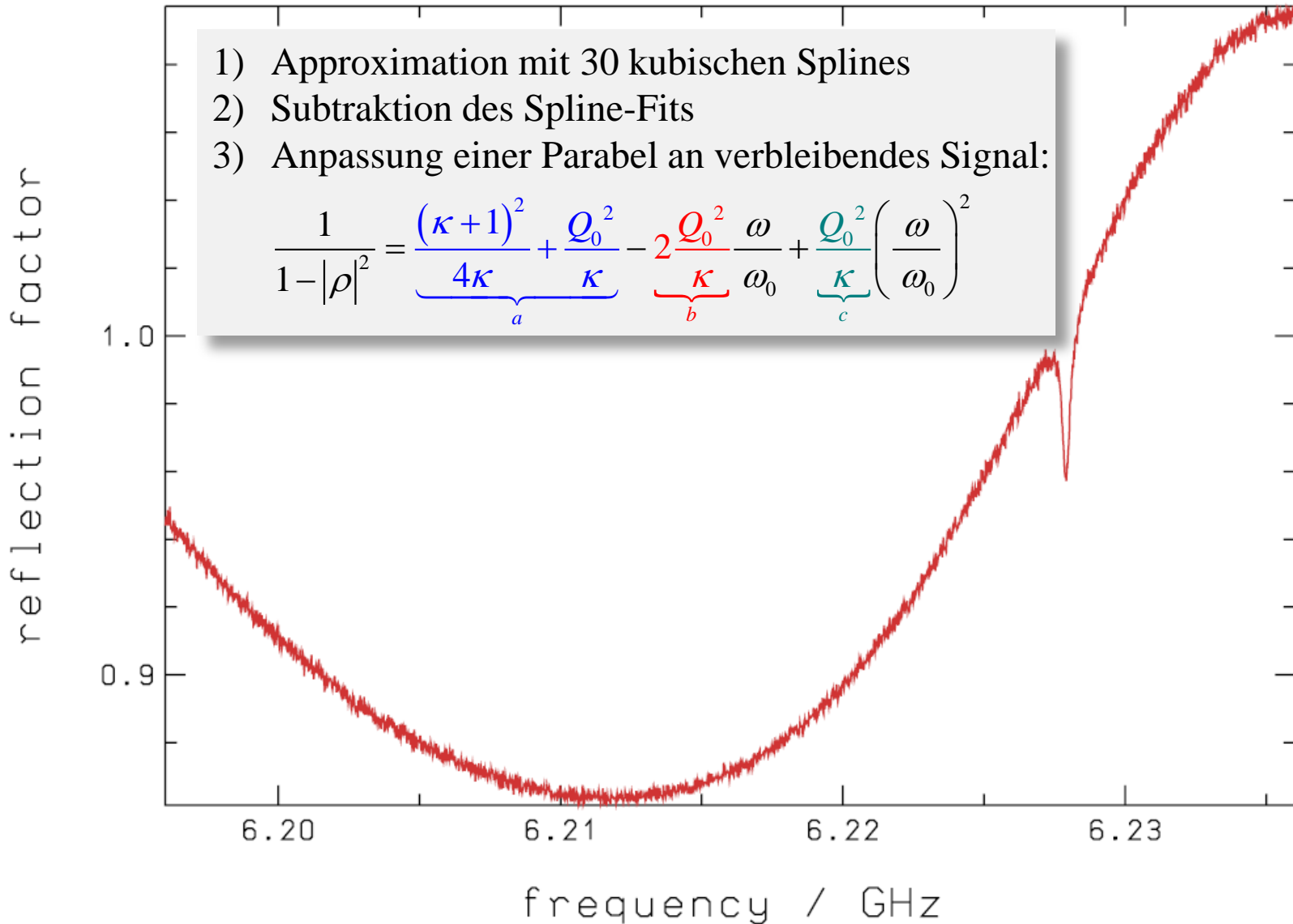


präzise Kenntnis der zu erwartenden Kreisgüte

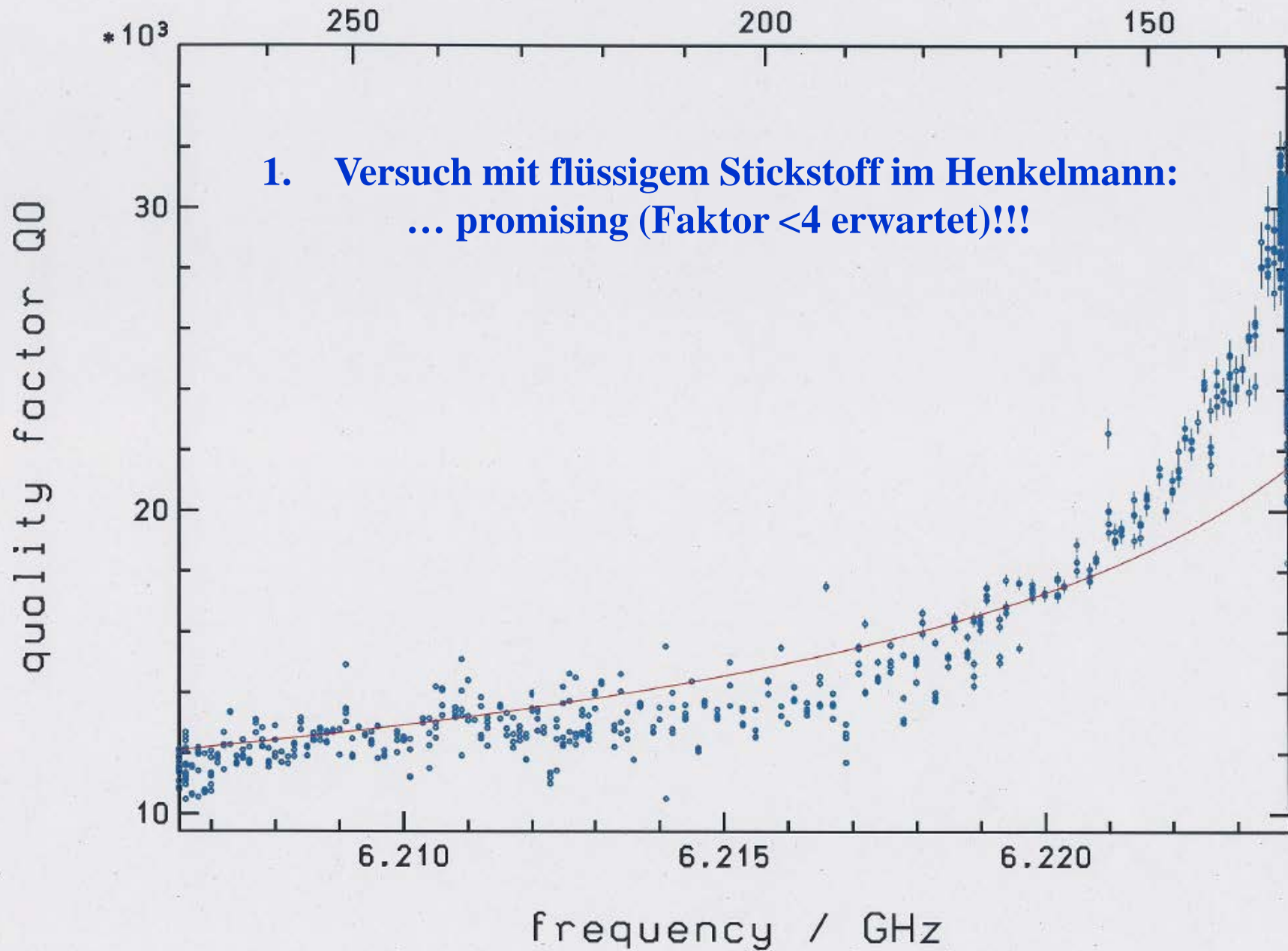
Stöbern durch die Literatur:

- Skintiefe: $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega_0 \sigma}} \approx 7,5\text{nm} @ 6\text{GHz} \& 4\text{K}$
- Oberflächenwiderstand: $R_{sf} = \frac{1}{\sigma \delta} = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_0}{2\sigma}}$ es geht mit der Wurzel!!!
- Kreisgüte: $Q_0 = \frac{j_0 \cdot Z_0}{2R_{sf} \left(1 + \frac{r}{L}\right)}$, mit: $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, $r = \text{Radius}$, $L = \text{Länge}$
- Shuntimpedanz: $R_s = 2 \frac{(Z_0 \cdot L)^2}{\pi^3 \cdot r^2 \cdot R_{sf} \cdot J_1(j_0) \cdot \left(1 + \frac{L}{R}\right)}$

Reflexionsfaktor @ 77K

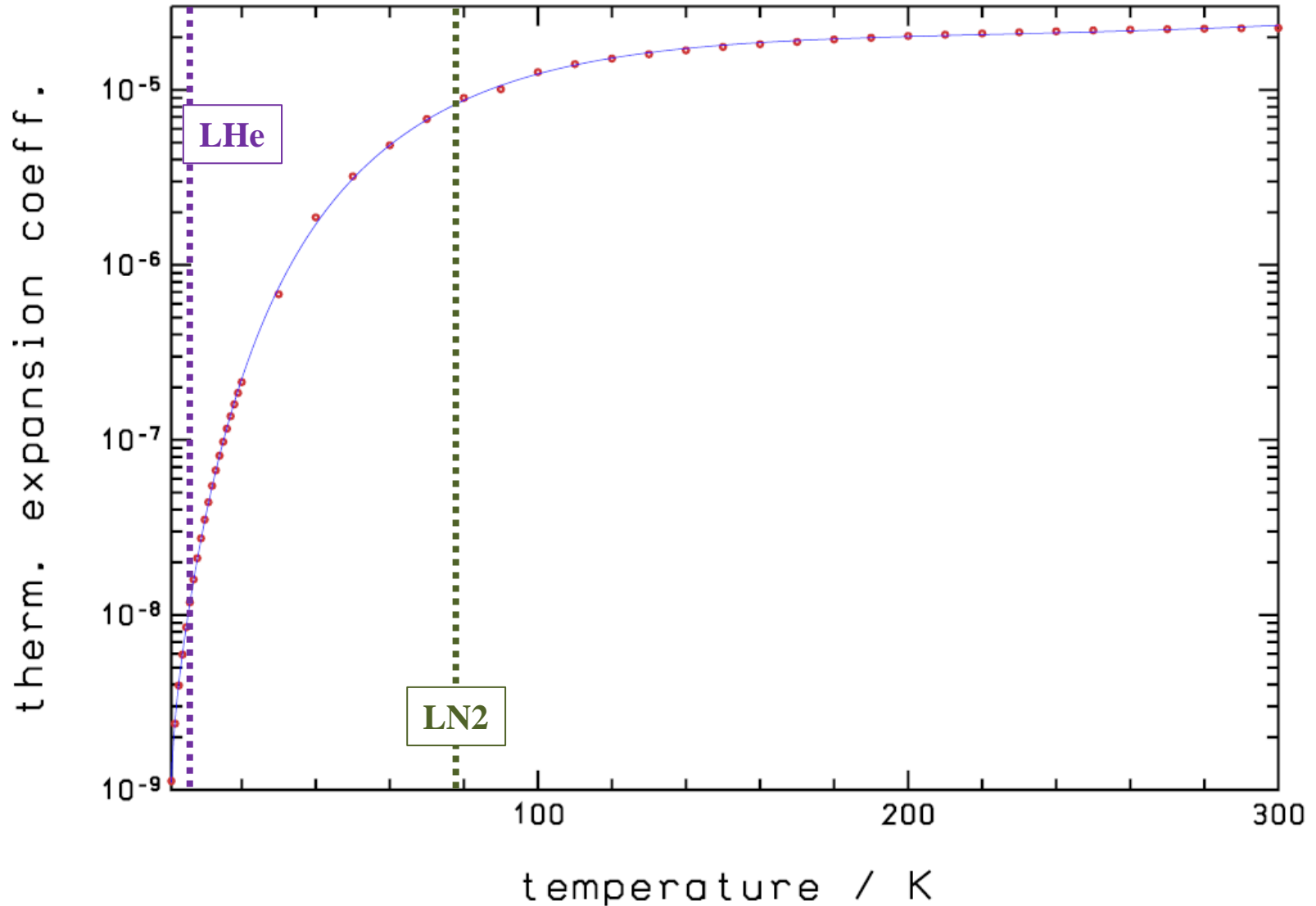


temperature / K



Relativer Ausdehnungskoeffizient

K. Anders: *Thermische Ausdehnung von Metallen bei tiefen Temperaturen*, Phys. kond. Mat. **2** (1964)



temperature / K

250

200

150

100

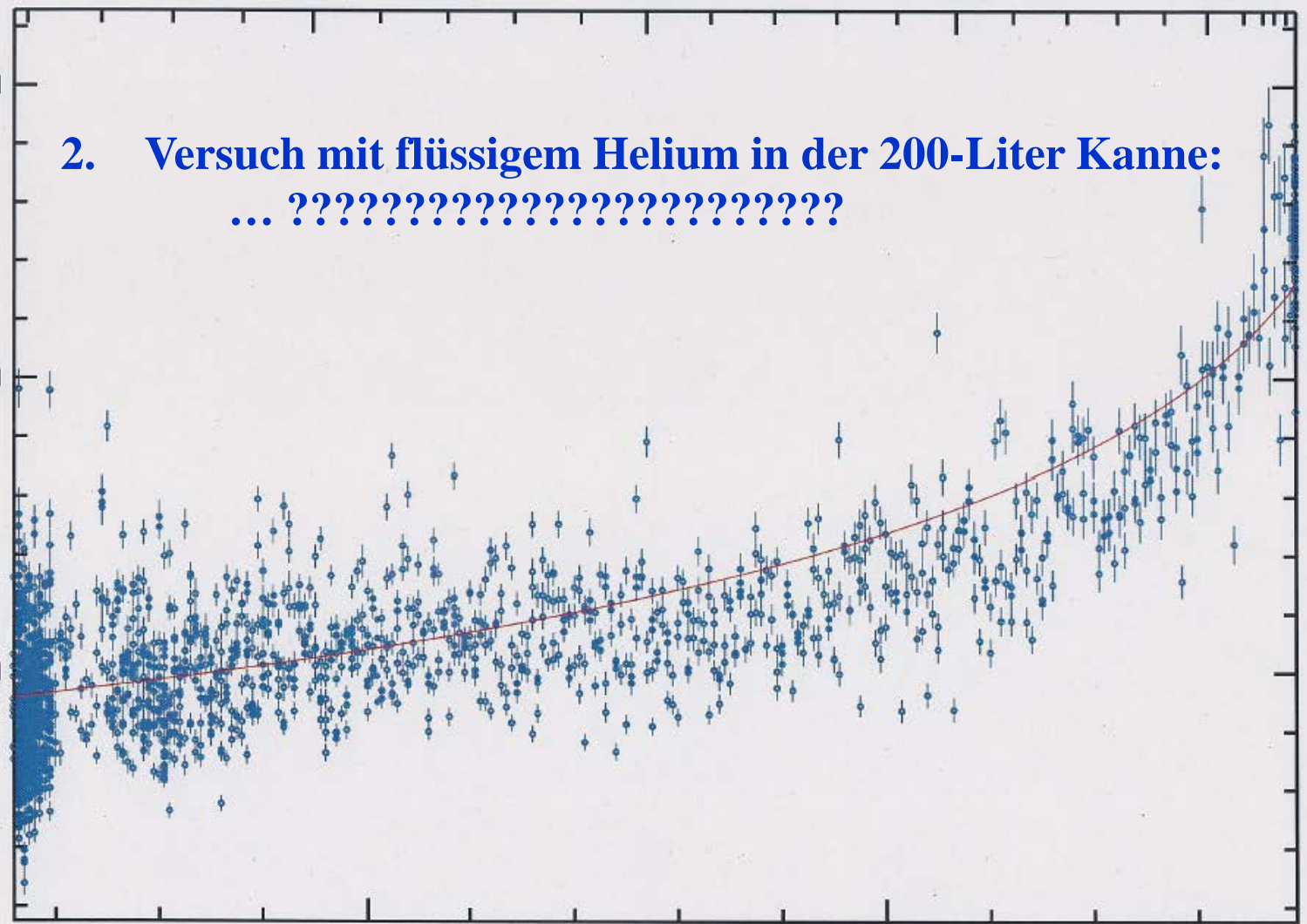
quality factor Q0

20000

15000

10000

**2. Versuch mit flüssigem Helium in der 200-Liter Kanne:
... ?????????????????????????????????**



6.21

6.22

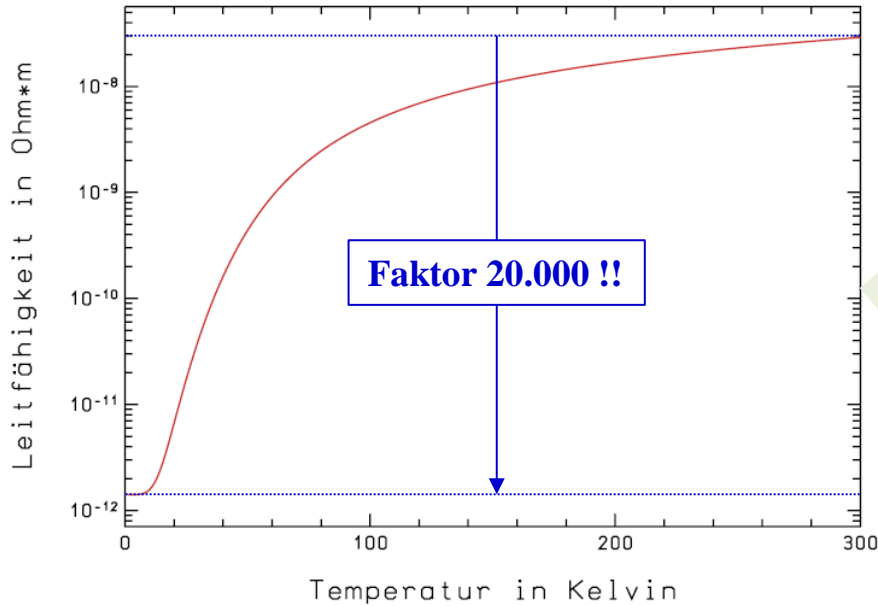
frequency / GHz

Wie steht's mit der Effizienz?

Bestimmung der gesamten Leistungsaufnahme $P_{RF} + P_{kryo}$
 → Ansatz: 1W Dissipation @ 4K ↔ 350W Kompressorleistung

Leitfähigkeit	7,54E+11		U [V/m]	1,00E+08		Pulse/s	50												
c / [m/s]	3,00E+08		I [A]	1		P-länge / ns	156			pro 100 MeV!									
f / GHz	l / cm	r / cm	δ / μ m	R_{surf} / Ω	Q	$R_{shunt} / M\Omega$	R_s M Ω /m	β_{opt}	t_{fill} / ns	$P_{cryo-fill} / W$	$P_{cryo-tot} / W$	P_{RF} / kW	η_{RF}	η_{CLIC}	P_{komp} / kW	RF / Cryo			
3	10,00	3,83	1,06E-02	1,25E-04	2,05E+06	201	4.017	81,3	1830	126,96	136,7	9,9	7,9%	28,5%	47,84	20,8%			
3,1	9,68	3,70	1,04E-02	1,27E-04	2,02E+06	198	4.083	82,7	1715	117,02	126,6	9,4	8,3%	28,5%	44,30	21,1%			
3,2	9,38	3,59	1,02E-02	1,29E-04	1,98E+06	194	4.148	84,0	1610	108,13	117,5	8,8	8,8%	28,5%	41,14	21,5%			
3,3	9,09	3,48	1,01E-02	1,31E-04	1,95E+06	191	4.213	85,3	1514	100,16	109,4	8,4	9,3%	28,5%	38,30	21,8%			
3,4	8,82	3,38	9,94E-03	1,33E-04	1,92E+06	189	4.276	86,5	1427	92,99	102,1	7,9	9,9%	28,5%	35,74	22,1%			
3,5	8,57	3,28	9,80E-03	1,35E-04	1,90E+06	186	4.338	87,8	1347	86,52	95,5	7,5	10,4%	28,5%	33,43	22,5%			
3,6	8,33	3,19	9,66E-03	1,37E-04	1,87E+06	183	4.400	89,0	1274	80,66	89,5	7,1	10,9%	28,5%	31,33	22,8%			
3,7	8,11	3,10	9,53E-03	1,39E-04	1,84E+06	181	4.461	90,2	1206	75,34	84,1	6,8	11,5%	28,5%	29,43	23,1%			
3,8	7,89	3,02	9,40E-03	1,41E-04	1,82E+06	178	4.521	91,4	1144	70,50	79,1	6,5	12,0%	28,5%	27,70	23,5%			
3,9	7,69	2,94	9,28E-03	1,43E-04	1,80E+06	176	4.580	92,6	1086	66,09	74,6	6,2	12,6%	28,5%	26,11	23,8%			
4	7,50	2,87	9,16E-03	1,45E-04	1,77E+06	174	4.638	93,8	1033	62,05	70,5	5,9	13,1%	28,5%	24,66	24,1%			
4,1	7,32	2,80	9,05E-03	1,47E-04	1,75E+06	172	4.696	94,9	983	58,35	66,7	5,7	13,7%	28,5%	23,33	24,4%			
4,2	7,14	2,73	8,94E-03	1,48E-04	1,73E+06	170	4.752	96,0	937	54,95	63,2	5,5	14,3%	28,5%	22,11	24,7%			
4,3	6,98	2,67	8,84E-03	1,50E-04	1,71E+06	168	4.809	97,2	894	51,83	59,9	5,3	14,9%	28,5%	20,98	25,0%			
4,4	6,82	2,61	8,74E-03	1,52E-04	1,69E+06	166	4.864	98,3	854	48,94	57,0	5,1	15,4%	28,5%	19,94	25,3%			
4,5	6,67	2,55	8,64E-03	1,53E-04	1,67E+06	164	4.919	99,4	817	46,28	54,2	4,9	16,0%	28,5%	18,97	25,6%			
4,6	6,52	2,50	8,55E-03	1,55E-04	1,65E+06	162	4.974	100,5	782	43,81	51,7	4,7	16,6%	28,5%	18,08	25,9%			
4,7	6,38	2,44	8,45E-03	1,57E-04	1,64E+06	160	5.027	101,5	749	41,53	49,3	4,5	17,2%	28,5%	17,25	26,2%			
4,8	6,25	2,39	8,37E-03	1,59E-04	1,62E+06	159	5.081	102,6	719	39,41	47,1	4,4	17,8%	28,5%	16,48	26,5%			
4,9	6,12	2,34	8,28E-03	1,60E-04	1,60E+06	157	5.133	103,7	690	37,44	45,0	4,2	18,4%	28,5%	15,76	26,8%			
5	6,00	2,30	8,20E-03	1,62E-04	1,59E+06	156	5.185	104,7	662	35,60	43,1	4,1	19,1%	28,5%	15,09	27,1%			
5,1	5,88	2,25	8,12E-03	1,63E-04	1,57E+06	154	5.237	105,7	637	33,89	41,3	4,0	19,7%	28,5%	14,47	27,4%			
5,2	5,77	2,21	8,04E-03	1,65E-04	1,56E+06	153	5.288	106,8	613	32,29	39,7	3,8	20,3%	28,5%	13,88	27,7%			
5,3	5,66	2,17	7,96E-03	1,67E-04	1,54E+06	151	5.339	107,8	590	30,79	38,1	3,7	20,9%	28,5%	13,33	28,0%			

Reinstaluminium gem. Grüneisen-Gesetz



Idee: BMBF-Projekt! "

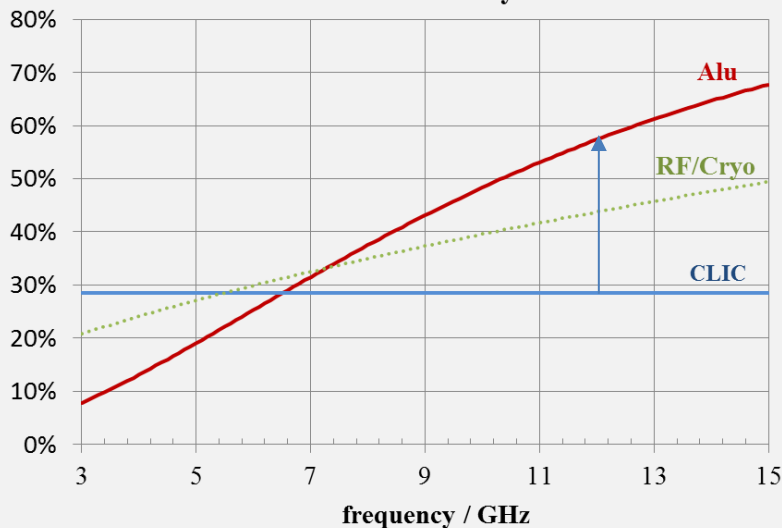


universität**bonn**

Parameter:

- Gradient: $U = 100 \text{ MV/m}$
Pulsstrom: $I = 1 \text{ A}$
Pulslänge: $\tau_p = 156 \text{ ns}$
Koppelfaktor: $\beta = 161 @ 12 \text{ GHz}$
Füllzeit: $\tau_f = 116 \text{ ns} @ 12 \text{ GHz}$
Wiederholrate: 50 Hz

RF Efficiency



Experimentelle Untersuchungen zur
Eignung von Reinstalu-Cavities
für den Resonatorenbau von
Hochgradientenstrukturen

Anlage zum Antrag auf Gewährung einer Bundeszuwendung auf Aufgabenbasis
Förderperiode: Juli 2015 – Juni 2018

Hochfeldresonatoren aus Reinstaluminium: Entwicklung und Test von Prototypen

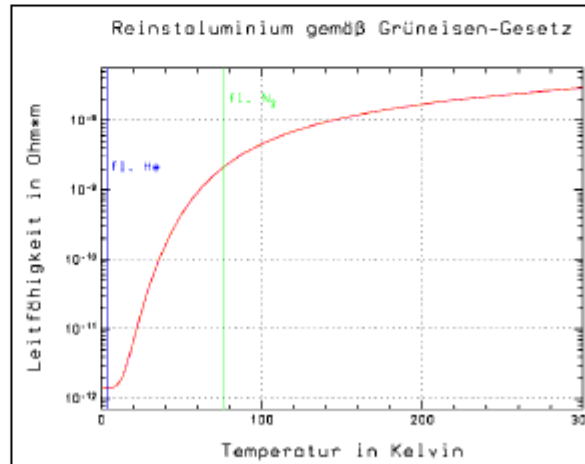
Antragsteller: PD Dr. Wolfgang Hillert, Beschleunigeranlage ELSA, Universität Bonn

Vorhabenbeschreibung

I. Ziele

I.1. Gesamtziel des Vorhabens

Wird Reinstaluminium auf Temperaturen unterhalb 20 Kelvin abgekühlt, steigt die Leitfähigkeit um mehr als vier Größenordnungen. Im Gegensatz zu für Hochfeldresonatoren üblicherweise verwendeten Supraleitern (z.B. Niob) bleibt Reinstaluminium aber selbst bei der Temperatur von flüssigem Helium noch im normalleitenden Zustand. Hieraus resultiert eine Unempfindlichkeit gegenüber starken Magnetfeldern, welche bei supraleitenden Resonatoren zu einem Übergang in den normalleitenden Zustand (Quench) führen. Damit böte die Verwendung von Reinstaluminium zum Bau von Hochfeldresonatoren besondere Vorteile (z.B. höhere Feldstärken, Betrieb in magnetischen Fokussierungsfeldern), die insbesondere für Hadronenlinacs von großer Bedeutung sein können und im Zuge des Auf- und Ausbaus des Beschleunigerkomplexes FAIR zeitnah untersucht werden sollten.



Gesagt, getan:

- 9 Seiten Antrag geschrieben
- Partner im SRF-Verbund mit Uni Frankfurt etc.
- Alles fertig, kurz vor Einreichung..
- Aber dann:

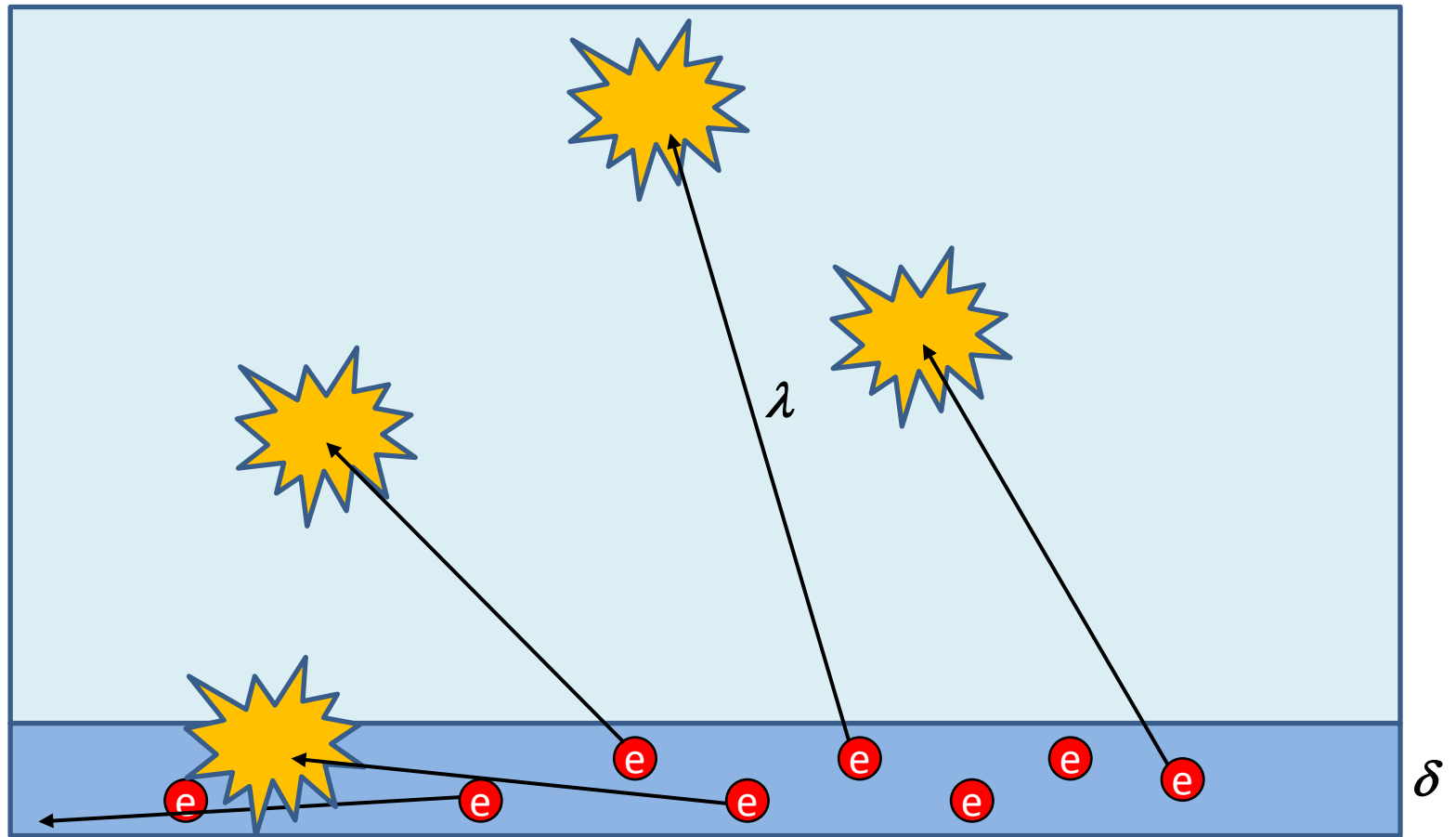
Klärung und Ernüchterung



Verzweiflung, Wut und Schrecken, begleiten ihren Fall ...

Aeneas besiegt den Turnus

Anomaler Skineffekt



Auswirkungen

W. Chou, F. Ruggiero: *Anomalous Skin Effect and Resistive Wall Heating*,
LHC Project Note 2 (SL/AP), Geneva 9/8/1995

Vergrößerung des Oberflächenwiderstands gemäß:

$$R_{sf} = \frac{1}{\sigma \cdot \delta} \rightarrow R_{sf} = R_{\infty} \cdot (1 + 1.157 \alpha^{-0.276}) \quad \text{für } \alpha \geq 3$$

wobei:

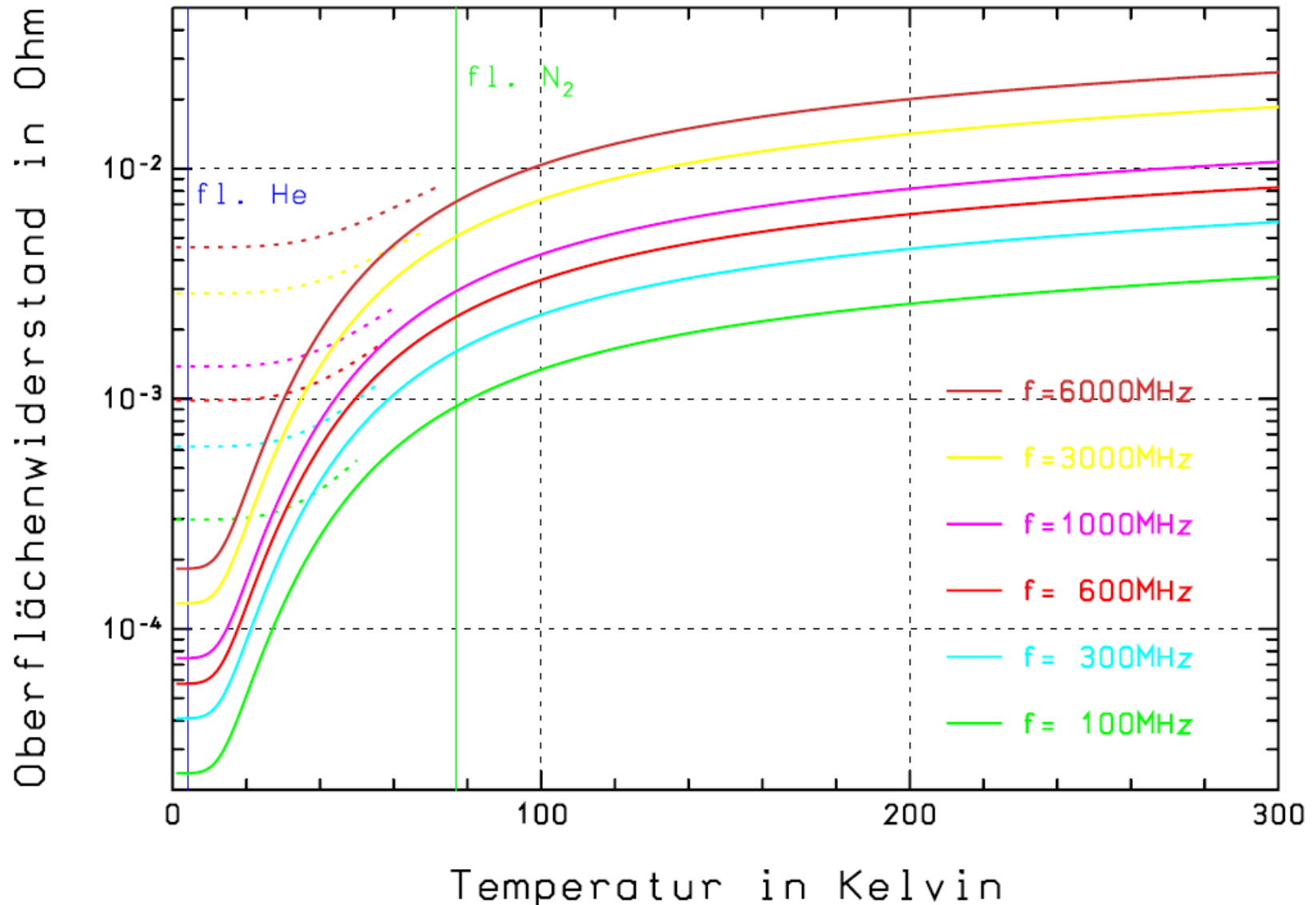
$$\alpha = \frac{3}{2} \left(\frac{\lambda}{\delta} \right)^2 = \frac{3}{4} \omega \mu_0 (\lambda \sigma)^2 \quad \text{und} \quad R_{\infty} = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{3}}{16\pi} \cdot \frac{\lambda}{\sigma} \cdot (\omega \mu_0)^2} = \frac{1}{\sigma \cdot \delta} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left(\frac{\lambda}{\delta} \right)}$$

Unbekannter „Materialkenngröße“ λ/σ mit $(\lambda/\sigma)_{\text{Cu}} = 6.6 \cdot 10^{-16} \Omega\text{m}^2$ nach

- A.F. Mayadas: *Intrinsic Resistivity and Electron Mean Free Path in Aluminium Films*, J. Appl. Phys. **39**,9 (1965)
- J.C. Ashley et al.: *Electron inelastic mean free paths and energy losses in solids*, Surf. Sci. **81** (1979)

gutmütig abgeschätzt zu $(\lambda/\sigma)_{\text{Al}} = 7 \cdot 10^{-16} \Omega\text{m}^2$!

Normaler und anomaler Skineffekt



...Ende...

*Kommt, ihr Töchter,
helft mir klagen ...*

*Für einen Faktor < 6
lohnt der Aufwand
nicht...*

Flucht des Aeneas

