

DESY A 2.6

Hamburg, den 4.12.57

Dr. Scha.

Gesichtspunkte zur Verringerung oder besseren Ausnutzung der  
Hochfrequenzleistung beim Elektronen-Synchrotron

(insbes. über die Abkürzung der relativen Beschleunigungszeit)

Die Kosten der Hochfrequenzanlage sind ein Hauptposten in den gesamten Anlage- und Betriebskosten eines 6 GeV Elektronen-Synchrotrons. Es erscheint daher vorteilhaft, diejenigen Parameter der Maschine, welche auf die Grösse der benötigten HF-Leistung von Einfluss sind, so festzulegen, dass der Bau und der Betrieb des Beschleunigers mit den geringsten Gesamtkosten möglich ist.

Zu diesem Zweck soll hier die generelle Abhängigkeit der HF-Leistung von folgenden Parametern diskutiert werden:

- 1) Impulswiederholungsfrequenz  $f$
- 2) Lage des Einschusszeitpunktes
- 3) Lage des Abschaltzeitpunktes
- 4) Länge der Beschleunigungsstrecken bzw. Grösse der mittleren Feldstärke

1) Die Impulswiederholungsfrequenz  $f$

Bei gleichbleibender Endenergie und gleichbleibender Teilchenmenge je Impuls ist die für Experimente verfügbare Leistung des Beschleunigers proportional der Wiederholungsfrequenz  $f$ , da der mittlere Ausgangsstrom der Maschine entsprechend ansteigt.

Im gleichen Verhältnis erhöht sich auch derjenige Anteil der HF-Leistung, welcher zur eigentlichen Teilchenbeschleunigung benötigt wird. Dieser Leistungsanteil, bleibt allerdings bei den z. Z. technisch realisierbaren Frequenzen noch weit hinter dem HF-Leistungsbedarf zur Deckung der

Strahlungsverluste und der Kreisverluste zurück. Da die letztgenannten Anteile unabhängig von  $f$  sind, erhöht sich die gesamte HF-Leistung nur unbedeutend mit der Wiederholungsfrequenz. Hohe Wiederholungsfrequenzen gestatten also eine bessere Ausnutzung der HF-Leistung, abgesehen von weiteren Vorteilen, welche hier nicht erörtert werden sollen.

Die Grenzen der Möglichkeiten und die von der Wiederholungsfrequenz abhängige Veränderung der Gesamtkosten sind praktisch allein durch die Eigenschaften des Führungsmagneten bestimmt.

## 2) Einfluss der Lage des Einschusszeitpunktes

Die rel. Einschaltzeit der HF-Leistungsverstärker weicht nur unwesentlich von der rel. Beschleunigungszeit ab. Soll die Energierhöhung der Teilchen gemäss einem zeitlichen Anstieg der Induktion  $B$  des Führungsfeldes nach einer Funktion ähnlich

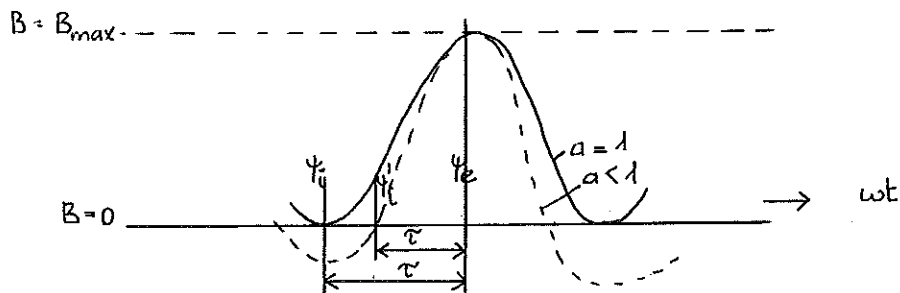
$$B = B_{max} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \omega t) \quad \text{mit } \omega = 2\pi f \quad (1)$$

erfolgen und zwar in dem Intervall  $\omega t_i = \psi_i$  bis  $\omega t_e = \psi_e$ , und ist dabei  $\psi_i$  ein kleiner Winkel,  $\psi_e$  nahe  $\pi$ , so ist die Beschleunigung am Anfang der Periode verhältnismässig gering. Dasselbe gilt auch für die in diesem Augenblick benötigte HF-Leistung. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die HF-Generatoren am Anfang der Beschleunigung unter starker Fehlanpassung arbeiten müssen, und sich hierbei der Wirkungsgrad erheblich verschlechtert. (Anm.: Ursache hierfür ist die von dem Elektronenstrahl herrührende Amplitudenabhängigkeit des Belastungswiderstandes, vgl. als Beispiel das Diagramm A 102) Eine Verkürzung der relativen Beschleunigungszeit durch möglichst spätes Einschliessen bietet daher Vorteile hinsichtlich der Ausnutzung der HF-Verstärker und bedeutet eine Verminderung der in den Verstärkerrohren auftretenden Verlustleistung. (Anm.: Zur quantitativen Abschätzung wurden für die infrage kommenden Klystrons Kennlinien bzw. Angaben über die Stromaufnahme im Kurzschluss- bzw. Leerlaufbetrieb angefordert)

Eine Lage des Einschusszeitpunktes, wie sie sich beispielsweise aus der Funktion

$$B = B_{max} \cdot \frac{1}{a+1} \cdot (a - \cos \omega t) \quad \text{mit } a < 1 \quad (2)$$

ergibt, wäre unter diesem Gesichtspunkt zweckmässig.



### 3) Einfluss der Lage des Abschaltzeitpunktes.

Bei der diskutierten Maschine wird der HF-Leistungsbedarf etwa von der Mitte bis zum Ende der Beschleunigungsperiode fast ausschliesslich durch die Strahlungsverluste der Elektronen und die Verluste in den Resonatoren bestimmt (vgl. z.B. das Diagramm A 101).

Die Strahlungsverluste  $\Delta W$  der Elektronen steigern sich beim Durchlaufen der gekrümmten Bahnabschnitte mit der 4. Potenz der Energie  $W$ , oder weil  $W \sim B$  sein muss, mit  $B^4$ . Die Spannung der Resonatoren muss also ebenfalls mit  $B^4$  gesteigert werden; die Verluste in den Resonatoren wachsen demzufolge mit  $B^8$  an.

Diese Umstände bedingen einen ausserordentlich hohen HF-Leistungsbedarf, wenn die Teilchen lange bei hohen Energien verweilen. Eine Vollendung der Beschleunigung nach möglichst wenigen Umläufen erscheint unter diesem Gesichtspunkt ganz besonders wichtig.

Betrachtet man beispielsweise die Verhältnisse bei einem zeitlichen Verlauf der Induktion  $B$  des Magnetfeldes nach der Funktion (1), so wäre eine Beendigung der Beschleunigung im Zeitpunkt  $B_e = B_{max}$ , d.h.  $\psi_e = \pi$  sehr unzweckmässig, da in dem letzten Abschnitt der Beschleunigungsperiode ganz erhebliche HF-Leistung ohne nennenswerte

Steigerung der Teilchenenergie verzehrt werden würde. Ist der Einschaltwinkel  $\psi_i$  verhältnismässig klein, so ist der zeitliche Mittelwert der Strahlungsverluste dem Integral

$$\int_0^{\psi_e} \left( \frac{B(\psi)}{B_e} \right)^4 d\psi = \int_0^{\psi_e} \left( \frac{1 - \cos \psi}{1 - \cos \psi_e} \right)^4 d\psi \quad (3)$$

mit guter Näherung proportional; die Resonatorverluste dem Integral

$$\int_0^{\psi_e} \left( \frac{1 - \cos \psi}{1 - \cos \psi_e} \right)^8 d\psi \quad (4)$$

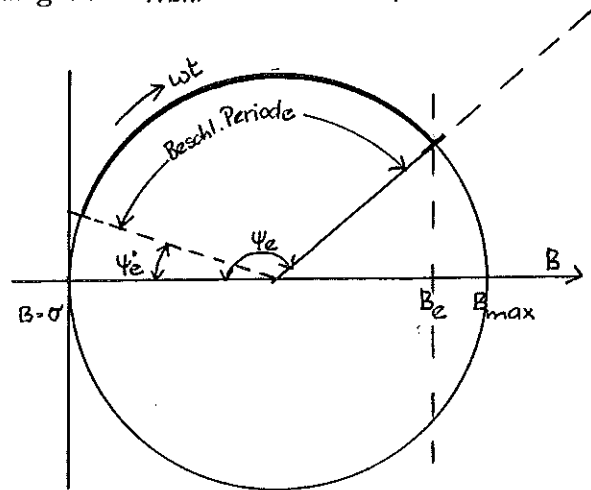
dabei ist für jeden Wert von  $\psi_e$  die gleiche Induktion  $B_e$  bei Beendigung der Beschleunigung angesetzt.

Der Maximalwert der Induktion würde sich gemäss dieser Bedingung im Verhältnis

$$\frac{B_{max}}{B_e} = \frac{2}{1 - \cos \psi_e} \quad (5)$$

erhöhen, wodurch grössere Verluste im Magneten entstehen.

Aus den beigefügten Diagrammen A 103 und A 104 geht die starke Abhängigkeit der HF-Leistung zur Deckung der Strahlungs- und Resonatorverluste von dem Abschaltwinkel  $\psi_e$  deutlich hervor. Geht man beispielsweise mit dem Abschaltwinkel  $\psi_e$  von  $180^\circ$  auf  $150^\circ$  zurück, so würde sich die mittlere HF-Leistung auf etwa 65 % ermässigen, während die in Kauf zu nehmende Erhöhung von  $B_{max}$  nur etwa 8 % ausmacht. Bei weiterer Verringerung von  $\psi_e$  auf  $100^\circ$  -  $120^\circ$  bräuchte man nur noch etwa 45 % an mittlerer HF-Leistung, bei einer Erhöhung von  $B_{max}$  auf etwa  $1,4 B_e$  (z. B.  $B_{max} = 11.200 \Gamma$  bei  $B_e = 8.000 \Gamma$ ).



Wenn man die Gesamtkosten überschlägt und weitere Faktoren wie z.B. Betriebssicherheit, Schonung der Vakuumkammer usw. berücksichtigt, so ist zu erwarten, dass in dem Bereich zwischen  $\Psi_z = 100^\circ$  und  $150^\circ$  der optimale Wert liegt.

Eine genauere quantitative Abschätzung der Verhältnisse setzt einerseits die Kenntnis des Kostenanstieges im Magnetsystem bei Erhöhung von  $B_{max}$ , andererseits Kenntnisse über den Wirkungsgrad, Lebensdauer usw. der Klystrons bei den vorliegenden speziellen Belastungsverhältnissen voraus.

#### 4) Einfluss der Gesamtlänge der Beschleunigungsstrecken bzw. der mittleren Feldstärke

Für die generelle Abhängigkeit der HF-Leistung von der Gesamtlänge der Beschleunigungsstrecken gilt folgende einfache Beziehung:

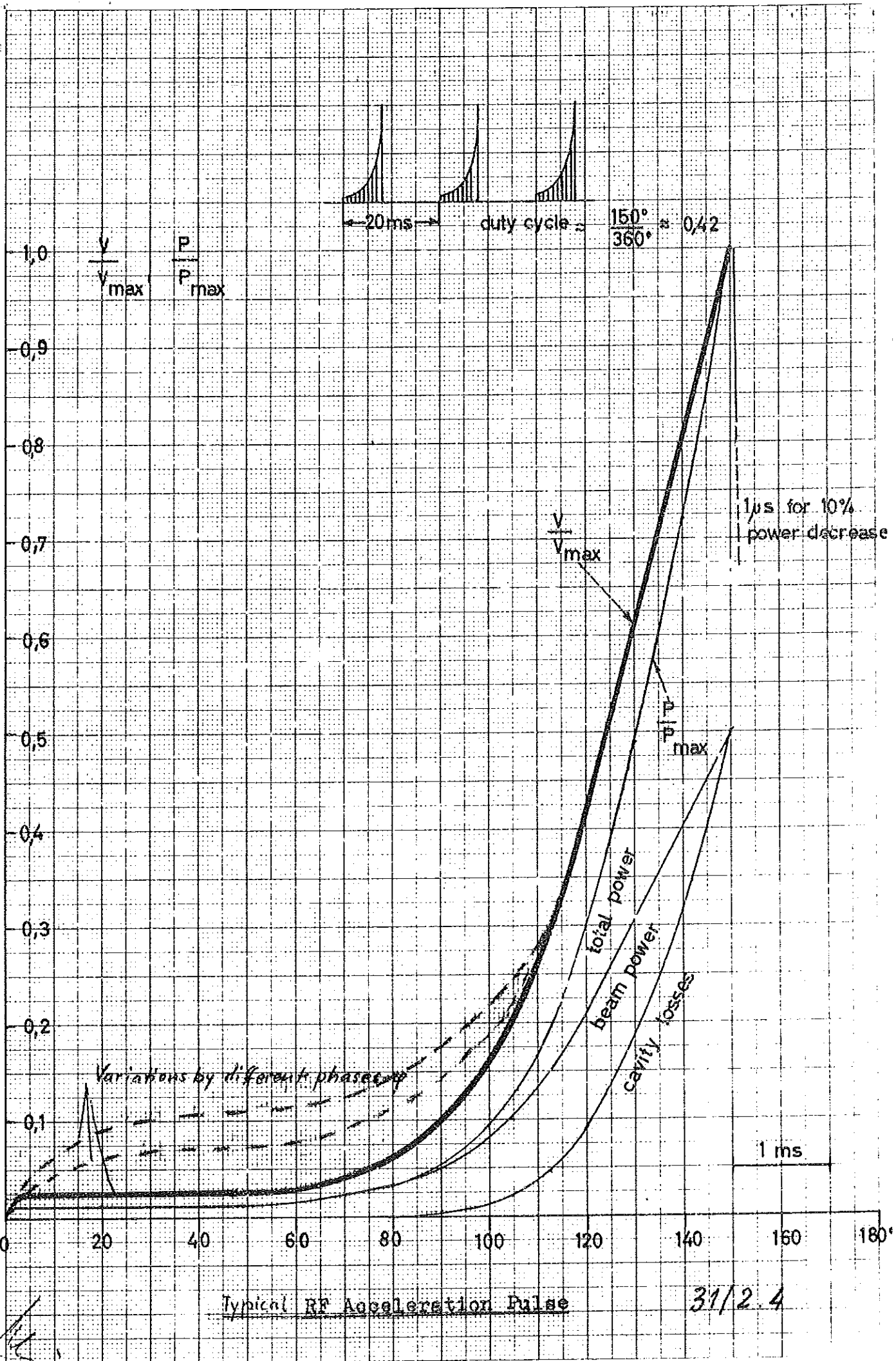
Die Gesamtverluste der Resonatoren sind der Gesamtlänge aller Beschleunigungsstrecken umgekehrt proportional.

Dies erkennt man, wenn man die Verhältnisse an zwei Beschleunigungsstrecken miteinander vergleicht, welche aus verschiedenen vielen Resonatoren derselben Güte, d.h. derselben Abmessung bestehen sollen, z.B. aus einem Resonator bzw. m Resonatoren. Dabei sollen die verschiedenen dimensionierten Beschleunigungsstrecken mit der gleichen Gesamtspannung U beaufschlagt sein. Die Verluste sind dann in derjenigen Beschleunigungsstrecke, welche aus einem Resonator besteht, von der Grösse  $U^2/R$ , wenn R der Resonanzwiderstand des Kreises ist. Für die aus m Resonatoren bestehende Beschleunigungsstrecke teilt sich die Gesamtspannung in m gleiche Teile auf, so dass der Verlust pro Resonator  $(U/m)^2 R$  wird. Der Gesamtverlust beträgt demzufolge für m Kreise  $U^2/mR$ , d.i. der m. Teil gegenüber der zuerst betrachteten Beschleunigungsstrecke.

Bei unveränderter Gesamtlänge aller Beschleunigungsstrecken hat eine Erhöhung der mittleren Feldstärke eine quadratische Erhöhung der Resonatorverluste zur Folge.

Die Gesamtverluste der Resonatoren betragen bei der von Livingston vorgeschlagenen Dimensionierung des HF-Systems ca. 50 % der gesamten mittleren HF-Leistung. Die Grösse dieses Anteils ist für die quantitative Abschätzung evtl. möglicher Ersparnisse von Bedeutung.

G. Schaffer

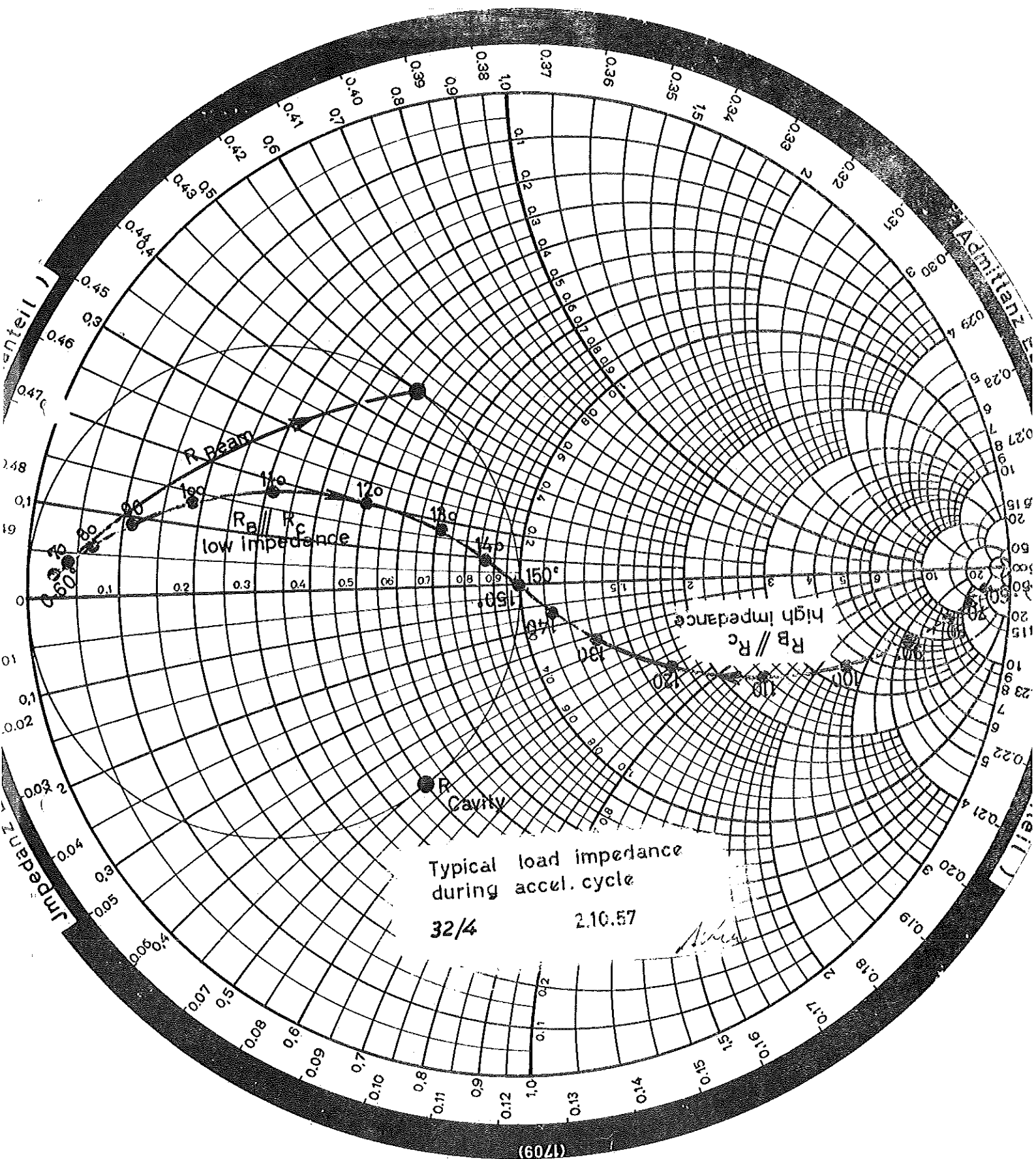


A 101 0  
2.10.57

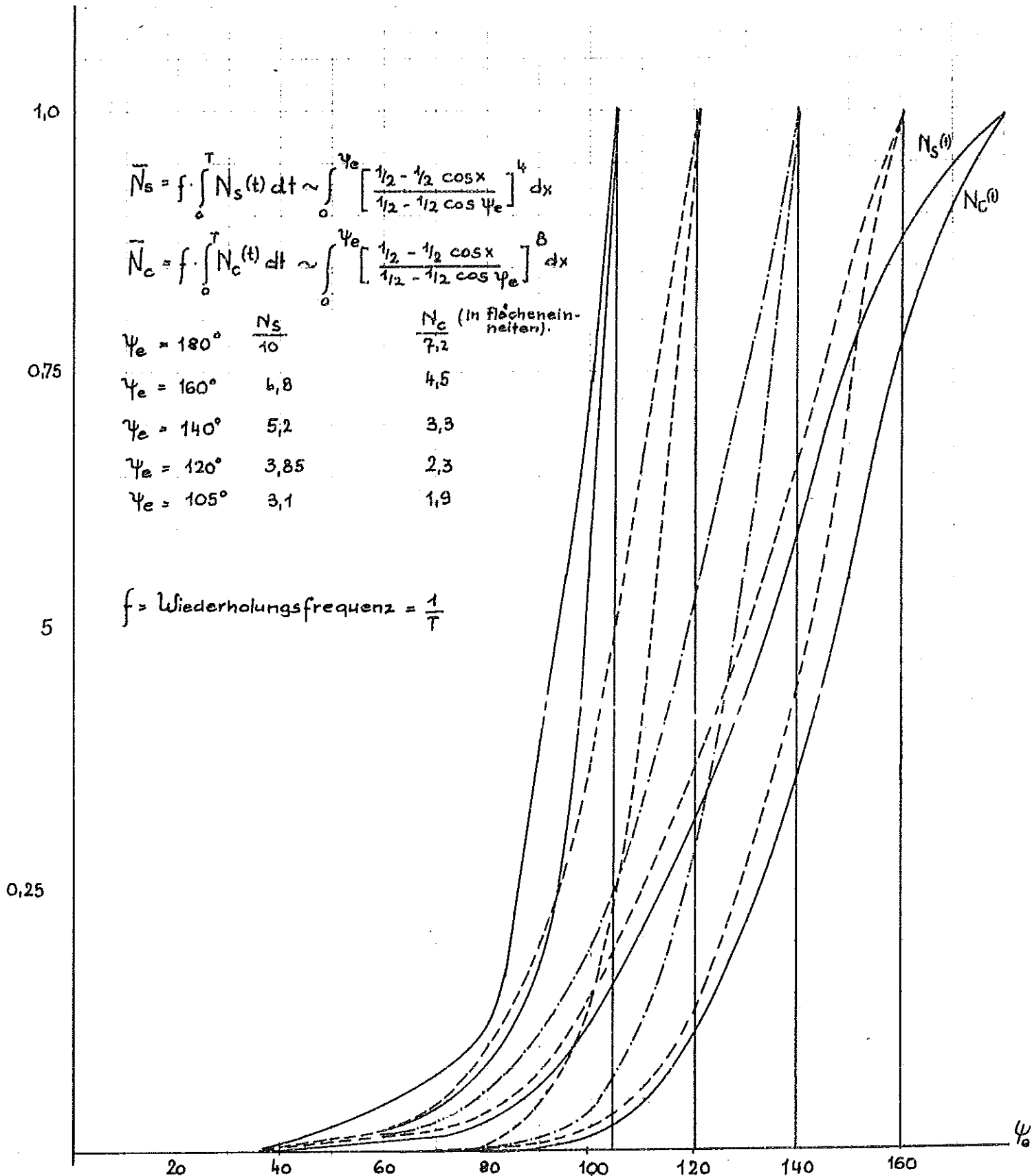
And. a  
4.12.57

Typical RF Acceleration Pulse

31/2.4

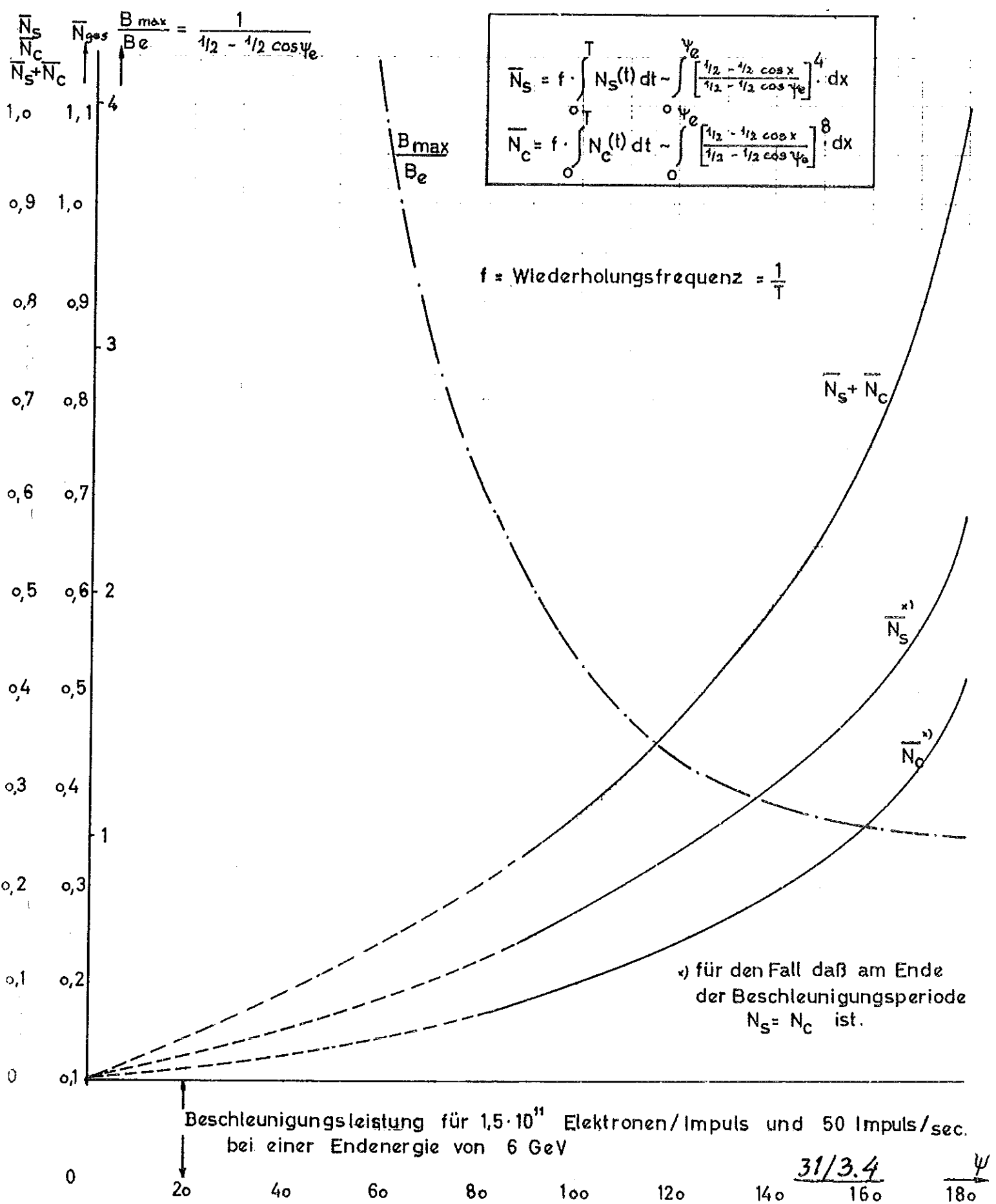






31/4.4

<b>DESY</b>	gez.:	Datum	Name	Gruppe: M 2 (HF)
	gepr.:	12. 57	Kn / Ge	Zchg. No.: A103
	gen.:			Blatt No.:
Maßstab:	Zeitlicher Verlauf und Mittelwerte der STRAHLUNGS- und CAVITYVERLUSTE für verschiedene Abschaltwinkel $\psi_e$			Ersatz für:
				Ersetzt durch:
				x ausf.:
				ausgef. von:
				Auftrag No.:



<b>DESY</b>	Datum	Name	Gruppe: M 2 (HF)
	gez.: 12.57	Kn / Ge	Zchg. No.: A 104
	geor.:		Blatt No.:
	gen.:		Ersatz für:
Maßstab:	Zeitliche Mittelwerte der <u>STRAHLUNGS</u> - und <u>CAVITY-VERLUSTE</u> für verschiedene Abschaltwinkel $\psi_e$		Ersetzt durch:
			x ausf.:
			ausgef. von:
			Auftrag No.: