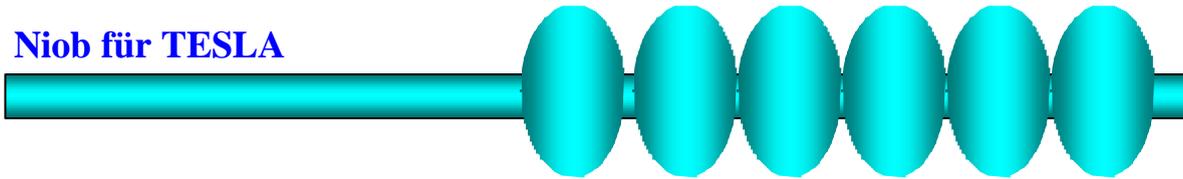


# Niob für TESLA

Eine globale Marktanalyse.

J. Kouptsidis, F. Peters, D. Proch, W. Singer



<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
<input type="checkbox"/> <a href="#">Einleitung</a>	2
<input type="checkbox"/> <a href="#">Niob Vorkommen</a>	3
<input type="checkbox"/> <a href="#">Niob Gewinnung</a>	4
<input type="checkbox"/> <a href="#">Niob Verbrauch</a>	5
<input type="checkbox"/> <a href="#">Niob Preise</a>	6
<input type="checkbox"/> <a href="#">Niob reinster Qualität</a>	7
<input type="checkbox"/> <a href="#">Niob für TESLA</a>	8
<input type="checkbox"/> <a href="#">Kostenabschätzung</a>	9
<input type="checkbox"/> <a href="#">Perspektiven</a>	11
<input type="checkbox"/> <a href="#">Zusammenfassung</a>	12
<input type="checkbox"/> <a href="#">Literatur</a>	13
<input type="checkbox"/> Anhang	14,15

## 1. Einleitung

Beim bisherigen Herstellungsverfahren der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen für TESLA [1] werden circa **800 Tonnen** Niob von höchster Reinheit in einem Zeitraum von drei bis vier Jahren benötigt. Für die vergleichsweise geringen Niobmengen zur Herstellung der TTF Resonatoren werden für dieses Material Preise zwischen 1000 und 1200 DM pro kg berechnet.

Der daraus resultierende Betrag für TESLA ist nicht nur für die Budgetplanung von großer Bedeutung, sondern er geht direkt in die technische Kostenoptimierung der Resonatoren ein. Andere wichtige Parameter der Maschine hängen wiederum von der Wandstärke der Resonatoren ab. Die Niobmaterialkosten beeinflussen also auch die technische Weiterentwicklung des TESLA Projektes in einem zentralen Sachgebiet.

Aus dieser Sachlage heraus entstand die Motivation für die vorliegende Analyse des globalen Niobmarktes.

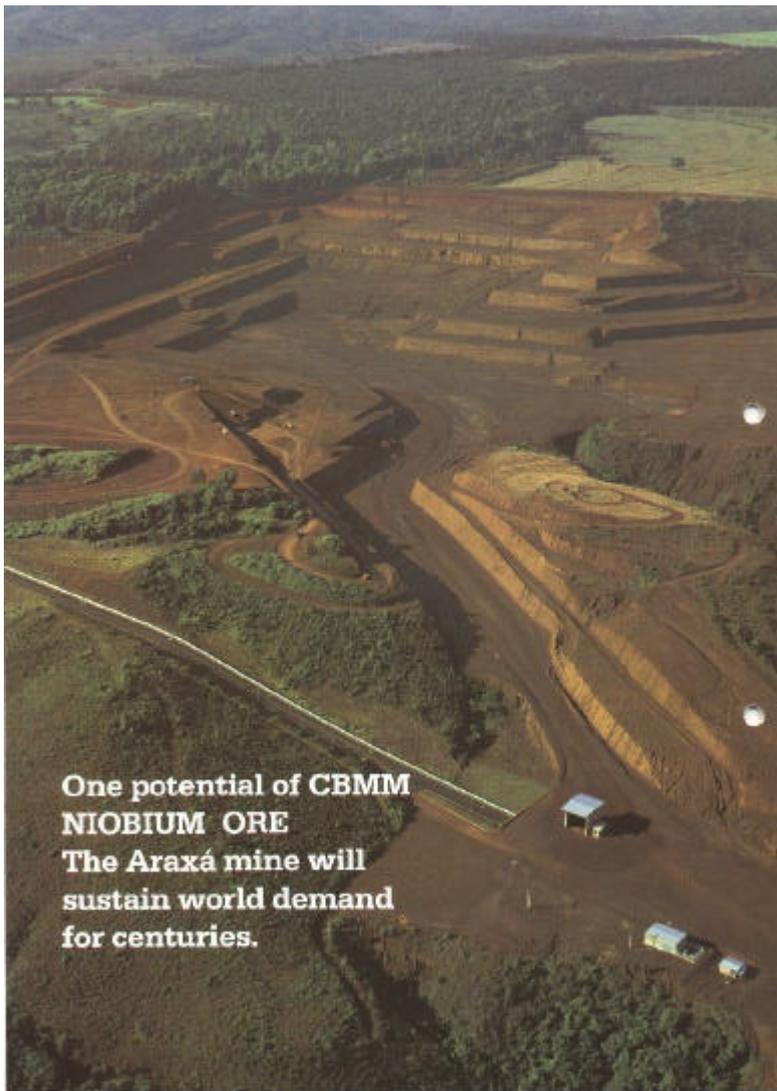
Im Verlaufe der Untersuchung wurde erkennbar, dass die erforderliche Niobmenge durch Rückführung der anfallenden Materialverschnitte in den Gewinnungsprozess erheblich reduziert werden kann. Auch wenn diese Rückführung zusätzliche Kosten verursacht, ergeben sich immer noch erhebliche Einsparungen im Vergleich zum bisherigen Verfahren, welches vor allem durch die relativ geringen Mengen Niob für die TTF Resonatoren bestimmt ist, wo solche Betrachtungen keine wesentliche Rolle spielen.

Die Kosten des Niobs werden von den Herstellern derzeit mit 400 \$ / kg entsprechend ~ 840 DM / kg bei einer Abnahmemenge von 550 Tonnen in Form von runden Blechen angegeben.

Um die generellen Ursachen der Niobpreise besser zu verstehen, sind in diesem Bericht einige allgemein zugängliche Informationen über die globalen Vorkommen, die technische Gewinnung und den weltweiten Verbrauch von Niob zusammengestellt worden.

Die Analyse liefert darüber hinaus mögliche Ansätze um die Planungssicherheit bei der Beschaffung des Niobs für TESLA zu erhöhen und die Kosten spürbar zu reduzieren.

## 2. Niob Vorkommen



Niob tritt in der Natur praktisch nur fünfwertig auf und da es Säurebilder ist, oft als Niobat. Es ist gewöhnlich mit Tantal in den Mineralien Pyrochlor  $(CaNa)_2(Nb,Ta,Ti)_2O_6(O,OH,F)$  und Columbit  $(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$  vergesellschaftet - vor allem in Alkaligesteinen.

Gegenwärtig wird Niob fast ausschließlich aus Pyrochlor Erzen gewonnen. Die größten Pyrochlor Lagerstätten befinden sich in Brasilien und Kanada. Pyrochlor wird nur im Tagebau abgebaut.

Mehr als 98 % der globalen Niobproduktion entfällt auf die beiden Länder Brasilien und Kanada mit lediglich drei Bergwerksbetrieben.

[2, 3, 4]

1. Araxá-Mine im Staat Minas Gerais/Brasilien.  
**CBMM** Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineracao.  
75% der Weltproduktion.
2. Catalao Mine im Staat Goias/Brasilien;  
**Brasimet**, Comercio e Industria;  
12% der Weltproduktion.
3. Chicoutimi-Mine in der Provinz Quebec/Kanada;  
**Niobec Inc**; **Cambior Inc**; **Teck Cor**;  
11% der Weltproduktion.

Die Weltproduktion an Niobprodukten beträgt ca. **22400** Tonnen Niobinhalt pro Jahr und kann kurzfristig auf 25000 Tonnen erhöht werden. [5]

Nur die im Tagebau vorhandenen Pyrochlor Erze von CBMM in Araxá / Brasilien - im Bild oben dargestellt - würden ausreichen, einen gleichbleibenden Niobbedarf für mindestens 500 Jahre zu decken. [6]

### 3. Niob Gewinnung

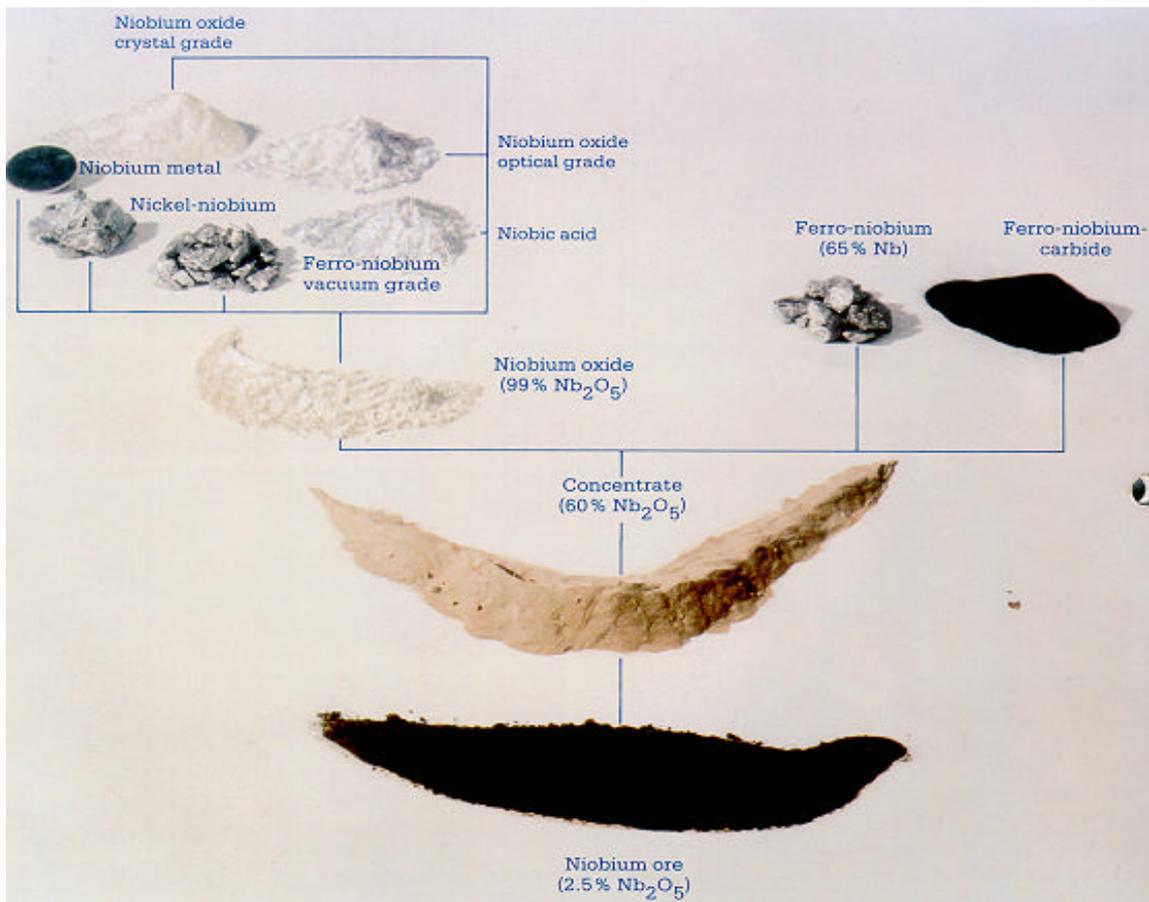


Abbildung 2: Verhüttungsfolge vom Erz zum Niobium von unten nach oben betrachtet.

Die Niobminerale werden zuerst mit Hilfe physikalischer Methoden wie Nassmahlen, magnetisches Reinigen, Ausschwemmen und Zentrifugaltrennen gereinigt. Im allgemeinen sind die daraus entstehenden Pyrochlorkonzentrate relativ frei von Tantal (< 1000 ppm) und können direkt weiterverarbeitet werden.

Im Falle vom Columbit erfolgt die Trennung von Tantal durch Lösen des Konzentrats in einer Säuremischung aus Fluss- und Schwefelsäure und durch eine anschließende Solventextraktion. Aus der Niobphase wird dann Niob mit Ammoniak gefällt und zu reinem Nioboxid kalziniert.

Die Reduktion des Nioboxids erfolgt meistens aluminothermisch zu sogenanntem ATR-Niob (Alumino-Thermally Reduced), seltener carbothermisch.

Niob mit einem Reinheitsgrad oberhalb von 99.95 % - z. B. für supraleitende Anwendungen - wird durch mehrmaliges Umschmelzen von reinem ATR-Niob in Elektronenstrahlschmelzanlagen [ 9,10,12] unter Hochvakuum hergestellt.

Diese Herstellungsmethode ist sehr zeitraubend und erfordert vergleichsweise hohe Investitionskosten. Dagegen stellt die nachfolgende Verarbeitung, wie Schmieden oder Walzen zur Herstellung von Halbzeugen keine außergewöhnlichen Anforderungen. Allerdings sind bei der Endbearbeitung der Niobhalbzeuge, wie reinigen und beizen, besondere Reinraumbedingungen zu beachten.

#### 4. Niob Verbrauch

Die Verteilung des Weltverbrauches für das Jahr 1999 von 22400 Tonnen Niobinhalt wird in der folgenden Tabelle gezeigt. [8]

Tabelle 1: Globaler Niobverbrauch 1999

<b>Niob Produkt Qualität</b>	<b>Niobinhalt in Tonnen</b>	<b>Produkt Verteilung in %</b>
Standard Ferro-Niob	20000	89.2
Rein Ferro-/ Nickel-Niob	1400	6.3
Niob commercial grade	600	2.7
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> für optische Linsen	400	1.8
<b>Summe</b>	<b>22400</b>	<b>100</b>

Etwa 90 % der Niobproduktion wird zu Ferro-Niob mit mehr als 60 Prozent Niobgehalt verarbeitet und dann als Zusatz für mikrolegierte Stähle verwendet [2,7].

Dieses Ferro-Niob ist spröde und läßt sich daher leichter als das zähere Niobmetall zerkleinern. Darüber hinaus bewirkt der Eisenzusatz eine Erniedrigung des Schmelzpunktes und damit eine Verringerung der Herstellungskosten.

Einsatzgebiete derartig legierter Stähle sind in zunehmenden Maße Kraftfahrzeugbau, Schiffbau, Bohrinseln, Pipelines sowie Armierungen in der Bauindustrie.

Etwa 5 % der Niobproduktion wird als Ferro- oder Nickel-Niob in nicht rostenden Stählen zur Erhöhung der Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit bei erhöhten Temperaturen zulegiert. Ebenfalls ca. 3 % wird zur Herstellung von Supralegerung für die Luftfahrtindustrie verwendet.

Die restlichen 2 % der Niobproduktion entfallen auf die Glasindustrie als Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> zur Erhöhung der Brechungsindizes von Glas, auf die biomedizinische Technologie für hypoallergene Implantate, auf die chemische Industrie zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit und schließlich auf die Anwendung als Supraleiter in verschiedenen Einrichtungen insbesondere auch für Kernspintomographen in der Medizin.

Niob mit 1 % Zirkonium wird in Hochleistungsnatriumdampflampen verwendet.

Recycling von Niob hat noch keinen nennenswerten Umfang angenommen, da in den meisten Fällen nur geringfügige Mengen an Niob den Stählen oder Supralegerungen zugesetzt werden und damit die Rückgewinnung technisch sehr aufwendig wäre.

## 5. Niob Preise

Seit 1979 wurden keine Preise von Pyrochlorkonzentraten veröffentlicht, da seitdem weder Brasilien noch Kanada Niob-Erze exportierten.

In beiden Ländern wird Pyrochlor im Inland verhüttet und in Form von Niob-Vormaterial exportiert. Preisbestimmend für Niobprodukte ist Ferro-Niob, da mehr als 90% der Niobproduktion für die Erstellung von niedrig legierten Stählen gebraucht wird.

Die Sättigung im Stahlhandel sowie die niedrigen Stahlpreise und die Möglichkeit, Niob durch andere Metalle zu ersetzen, zwingen die Niobmonopolisten aus Brasilien und Kanada, die Preise konstant zu halten. Zur Preisstabilität wirken darüber hinaus die großen Vorräte an Niob bei den Stahlproduzenten und im Stockpile der USA [4,5]. Es ist daher zu erwarten, daß die Preise des Rohstoffes in absehbarer Zeit unverändert bleiben werden.

In der Tabelle folgenden sind die mittleren Niobpreise 1999 zusammengetragen [4,5,7].

Tabelle 2: Niobpreise Index 1999 für verschiedene Qualitäten.

Niob Produkt Qualität	Preis \$ / Ib	Preis DM / kg
Pyrochlor *	4.07	19.29
Standard Ferroniob	6.88	32.61
ATR-Niob Rein Ferro- / Nickel-Niob, mit Ta 500 - 1000 ppm.	15.88	<b>75.27</b>
ATR 3x EB-Erschmolzen, 99,75 % Nb commercial grade, mit 2000 ppm Ta	24.95	118.25
ATR 3x EB-Erschmolzen, 99,86 % Nb reactor grade, mit 1000 ppm Ta	27.21	129.00



Umrechnungsfaktoren 1\$ = 2,15 DM 1kg = 2,20462 lb

\* Zum besseren Verständnis des Einflusses der verschiedenen Fertigungsprozesse auf den Niobpreis ist am Anfang der Tabelle auch der letzte verfügbare Pyrochlorpreis von 1979 mit 2.85 \$ / Ib Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, umgerechnet auf 4.07 \$ / Ib Niob-Inhalt, angegeben.

Eine zusammenfassende Betrachtung der Tabellen 1 und 2 ergibt, daß sich der Niob-Bedarf für TESLA über einen Zeitraum von drei Jahren nicht auf das Gleichgewicht des kommerziellen Marktes auswirken kann.

Die Preise dieses Marktes werden nur vom Ferro-Niob-Bedarf und indirekt von der Stahlkonjunktur bestimmt. Letztere ist jedoch gesättigt, sodass man für die nächsten Jahre mit stabilen Preisen von ATR-Niob, als den Rohstoff zur Herstellung des Niobs für TESLA, rechnen kann.

Ein deutlicher, weltweiter Engpass liegt jedoch in der Herstellung von diesem reinsten Niobmaterial mit einem Niobgehalt > 99.95 %, der durch das mehrmalige Umschmelzen des ATR-Niobs in Elektronenstrahlschmelzanlagen unter Vakuum hervorgerufen wird.

**Genau diese Materialqualität wird für die TESLA Strukturen benötigt.**

## 6. Gewinnung von Niob reiner Qualität

Nach dem heutigen Stand der Technik werden supraleitende Hochfrequenzresonatoren aus reinstem Niob mit einem Niobgehalt von mindestens **99,95 %** gefertigt.

Verunreinigung an leichten Elementen wie O, N und C, dürfen insgesamt die 20-30 ppm Marke nicht übersteigen. Das Schwermetall Tantal darf bis maximal 500 ppm im gelösten Zustand anwesend sein. [9]

Dieser hohe Reinheitsgrad ist erforderlich, um eine gute Wärmeleitfähigkeit vom Niob im supraleitendem Zustand zu gewährleisten.

Der integrale Reinheitsgrad lässt sich mit Hilfe des sogenannten RRR-Wertes (Residual Resistance Ration) durch Bildung des Quotienten des elektrischen Widerstandes bei Zimmertemperatur und bei 4<sup>0</sup> K leicht messen. [9]

Normalerweise werden RRR Werte größer als 300 für reines Niob zur Fertigung von supraleitenden Resonatoren verlangt.

Durch sechsmaliges Umschmelzen von ATR-Niob mit Hilfe von Elektronenstrahlen ist es möglich diesen Reinheitsgrad von Niob zu erreichen. [ 9, 10,12 ]

Beim Umschmelzen unter Vakuum bei 2770<sup>0</sup>K verdampfen alle Metallverunreinigungen mit Ausnahme von Ta, W und Mo, die schon in ATR-Niob nicht vorhanden sein dürften. Eine ausreichende Reinheit an Ta, W und Mo erreicht man gewöhnlich durch Sortieren der Erze bzw. durch chemische Vorreinigung von Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, des Vormaterials zur Herstellung von ATR-Niob.

Die Dimensionierung und die Kosten einer Umschmelzanlage zur Deckung des TESLA Bedarfes lässt sich an Hand von bekannten Daten [9, 10, 12] und vorhandener Anlagen abschätzen:

Energiebedarf pro Umschmelzung	8 kWh / kg
Anzahl der Umschmelzungen	6
Jährlicher Niob-Bedarf für TESLA	2.77 x 10 <sup>5</sup> kg
Jährlicher Energiebedarf 6 x 8 x 2.77 x 10 <sup>5</sup>	1.33 x 10 <sup>7</sup> kWh
<b>Leistung der Anlage für 4000 h / Jahr</b>	<b>3325 kW</b>

Tabelle 3. Erforderliche Parameter für eine Elektronenstrahlschmelzanlage.

Sicherheitshalber würde man eine 3500 kW Elektronenstrahlschmelzanlage einsetzen, die nach Mitteilung der beiden potentiellen Anbieter aus der Bundesrepublik etwa 30 Millionen DM kosten dürfte.

Möglicherweise sind auch zwei oder drei entsprechend kleinere Anlagen für die Herstellung des Niobs für TESLA vorteilhafter, weil dann die Reinheitsgrade stufenweise in den verschiedenen Anlagen gesteigert werden könnten.

Diese und andere Fragen bleiben der späteren genaueren Untersuchung und einer detaillierten Spezifikation der Anlagen vorbehalten.

## 7. Niob für TESLA

Der TESLA Bedarf von **550 Tonnen** insgesamt bzw. ~180 Tonnen Niob pro Jahr ist deutlich höher als die derzeitige weltweite Jahresproduktion von reinstem Niob.

Zur Zeit arbeiten alle existierenden Schmelzanlagen ausgelastet, um die große Nachfrage nach Titan und vor allem Tantal zu decken, so dass praktisch keine freien Kapazitäten für die Herstellung von Niob für TESLA vorhanden sind.

Nur eine Anlage bei der Fa. CBMM in Brasilien schmilzt ausschließlich Niob. Die Leistung dieser Anlage beträgt 450 kW mit einer Jahresproduktion von ca. 40 bis 60 t Niob.

Alle anderen Niob-Lieferanten benutzen zeitweilig ihre Tantal-Anlagen zum Umschmelzen von Niob, was aufgrund von Tantaleinträgen möglicherweise zu schlechteren Qualitäten des Niobs führt.

**Aus diesen Erkenntnissen folgt, dass die Menge Niob für TESLA voraussichtlich nur mit neuzubauenden Schmelzanlagen qualitativ sicher und preiswert gewonnen werden kann.**

Die folgende Abbildung zeigt die räumliche Ausdehnung einer solchen Schmelzanlage.

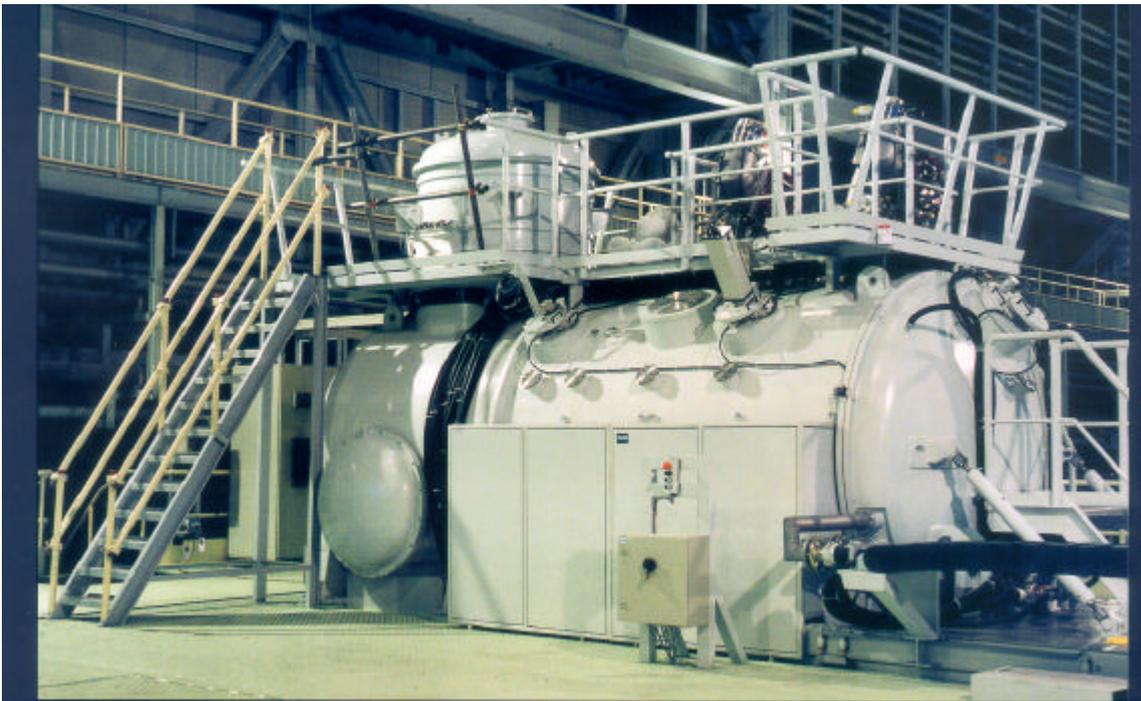


Abbildung 3: Elektronenstrahl Schmelzanlage der Firma **von Ardenne Anlagen Technik**. Dresden  
Typ: EMO 1500 mit 2 \* 750 kW Elektronenstrahlen = 1500 kW Schmelzleistung.

Die Kosten einer solchen Anlage und ihr Einfluss auf den Preis des Niobs für TESLA werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

## 8. Kostenabschätzung

Bei der Gewinnung des Niobs für TESLA durch sechsmaliges Umschmelzen von marktüblichem ATR Niob entstehen verfahrensbedingte Materialverluste von etwa zwanzig Prozent. [9]

Das Niob liegt nach dem Schmelzen in Form von Rohlingen (Ingots) mit einem Durchmesser von 250 bis 350 Millimetern und einer Länge von ca. 1 bis 2 Metern vor. Diese Rohlinge werden je nach Verwendungszweck zu Blechen unterschiedlicher Größe verarbeitet und als Halbzeuge bereitgestellt.

Beim Umformen dieser Rohlinge zu Halbzeugen durch Schmieden, Schneiden, Walzen, Schleifen usw. entstehen weitere Materialverluste von fünf bis zehn Prozent.[12] Alle Verluste werden in der Kostenabschätzung entsprechend berücksichtigt.

Die Tabelle 4 zeigt einen Kostenspiegel über die Gewinnung von 700 Tonnen Niob für TESLA in der Form von Scheiben mit einem Durchmesser von 265mm und 3mm Dicke.

Tabelle 4. Kostenfaktoren und Verfahrensschritte mit Kostenverteilung

#	Kostenfaktoren, Prozeduren & Wirkungsgrade.	Tonnen	DM / kg	Kosten in DM
1	Investition für die Schmelzanlagen			50,000,000
2	Investition Werkzeuge zur Halbzeugherstellung			12,000,000
3	Rohmaterial ATR Niob mit 4 % Al, 500 ppm Tantal	1532.3	75.25	115,305,575
4	Schmelzen sechsfach, 19 % Materialverlust	1241.2	55.00	84,276,500
5	Blechplatten 3mm dick herstellen. 6% Verlust	1166.7	60.00	70,001,593
6	TESLA Nb Scheiben d=265 mm ( 40 % Verschnitt)	700.0		
	<b>Gesamtmenge TESLA Niob in Form von Scheiben</b>	<b>700.0</b>	<b>473.68</b>	<b>331,583,668</b>

Der Preis einer Schmelzanlage für das TESLA Niob von **50 Millionen DM** wurde durch einen Vergleich mit einer ähnlichen Anlage gewonnen.

Diese Anlage mit einer Leistung von 5500 kW und Gesamtkosten von 38,5 Millionen \$ wurde Ende 1998 in Richland, USA, fertiggestellt [11].

Durch lineare Skalierung auf 3500 kW erhält man den Preis für die TESLA Schmelzanlage einschließlich der Gebäude und der Infrastruktur.

Die Investitionskosten für die Werkzeuge zur Halbzeugherstellung wurden aus Erfahrungswerten mit vergleichbaren Anlagen und Verfahren abgeschätzt.

Die Betriebskosten für das sechsmalige Umschmelzen von **~ 55 DM/ kg** ergeben sich aus der detaillierten Kostenrechnung im Anhang Teil A.

Die einzelnen Verfahrensschritte zur Herstellung der Bleche aus dem Niob Rohmaterial sind in einem Bericht über die Fertigstellung des CEBAF Projektes \* sehr ausführlich beschrieben. [12] Sie werden in diesem Bericht im Anhang Teil B näher erläutert.

\* CEBAF = Continuous Electron Beam Accelerator Facility, Washington DC, USA

Wie aus der Tabelle 4 ersichtlich ist, entstehen größere Verschnittmengen bei der Gewinnung der runden Niobscheiben aus den rechteckigen Blechplatten.

Diese Verschnittmengen liegen je nach Geometrie der Ausgangsbleche zwischen dreißig und vierzig Prozent der Halbzeugmenge. Da sie aus hochreinem Niob Material bestehen, sollten sie durch ein erneutes Umschmelzen in den Fertigungskreislauf zurückgeführt werden.

In der folgenden Tabelle ist die Kostenverteilung mit Rückgewinnung dieser Verschnitte dargestellt.

Tabelle 5. Kostenfaktoren und Verfahrensschritte mit Rückgewinnung der Verschnitte.

#	Kostenfaktoren, Prozeduren & Wirkungsgrade.	Tonnen	DM / kg	Kosten in DM
1	Investition für die 3500 kW Schmelzanlage			50,000,000
2	Investition Werkzeuge zur Halbzeugherstellung			12,000,000
3	Rohmaterial ATR Niob mit 4 % Al, 500 ppm Tantal	1027.5	75.25	77,319,375
4	Schmelzen sechsfach mit 19 % Materialverlust	832.3	55.00	56,512,500
5	Blechplatten 3mm dick herstellen mit 6 % Verlust	782.3	60.00	46,940,310
6	<b>TESLA Nb Scheiben d=265 mm ( 40 % Verschnitt )</b>	<b>469.4</b>		
7	Schmelzen zweifach, 4 % Materialverlust	300.4	20.00	6,008,360
8	Blechplatten 3mm dick herstellen mit 6% Verlust	282.4	60.00	16,943,574
9	<b>TESLA Nb Scheiben d=265 mm ( 40 % Verschnitt )</b>	<b>169.4</b>		
10	Schmelzen zweifach, 4 % Materialverlust	108.4	20.00	2,168,778
11	Blechplatten 3mm dick herstellen. 6% Verlust	101.9	60.00	6,115,953
12	<b>TESLA Nb Scheiben d=265 mm ( 40 % Verschnitt )</b>	<b>61.2</b>		
	<b>Gesamtmenge TESLA Niob in Form von Scheiben</b>	<b>700.0</b>	<b>391.44</b>	<b>274,008,849</b>

Die spezifischen Kosten liegen damit bei ca. **400 DM / kg** Niob der TESLA Qualität.

Ein Vergleich von Tabellen 4 und 5 macht deutlich, dass durch die Rückführung der Materialverschnitte eine Kosteneinsparung von ~ **58 Millionen DM** erreicht werden kann. Damit übersteigt dieser Betrag sogar die Investition für die neue Schmelzanlage.

Für TESLA werden beim diesem Fertigungsverfahren für die runden Rohlinge nur noch **500 bis 550 Tonnen** Niob benötigt.

Die in der Tabelle 5 eingesetzte Kalkulationsmenge von 700 Tonnen beinhaltet auch dann noch einen erheblichen Überschuss, wenn größere Materialmengen auf Grund von nicht beseitigbaren Verunreinigungen als Verlust ausgesondert werden müssen.

Alle derzeit in der Entwicklung befindlichen anderen Verfahren zur Herstellung der TESLA Resonatoren benötigen eher weniger Niobmaterial.

Aus der Tabelle 5 ist ebenfalls erkennbar, dass die Rohmaterialkosten letztlich nur ca. 20 Prozent des Endpreises darstellen. Preisschwankungen und Währungsunsicherheiten gehen dementsprechend geringer in die Finanzplanung ein. Letzteres natürlich nur, wenn die Niobveredelung im europäischen Währungsraum stattfindet.

## 9. Perspektiven

Auch wenn die heutigen industriellen Hersteller das Niob für TESLA in Zukunft billiger anbieten sollten als bisher, ist die genaue Kenntnis des Herstellungsverfahrens und die daraus verifizierbaren Kosten für das TESLA Projekt von erheblicher Bedeutung.

Diese Kenntnisse werden natürlich in dem Maße zunehmen, in dem sich DESY mit den kritischen Parametern solcher Umschmelzanlagen befasst.

Die bei DESY reichlich vorhandene Expertise in den Bereichen Vakuumtechnik, Betrieb von Elektronenstrahleinrichtungen und dem Anlagenbau im Starkstromsektor könnte zusammen mit den prädestinierten Herstellern (v. Ardenne & ALD) für die Optimierung der Schmelzanlagen im Hinblick auf TESLA genutzt werden. Vor allem auch deshalb, weil für TESLA ohnehin neue Umschmelzanlagen gebaut und betrieben werden müssen. Diese Anlagen werden dann wohl in jedem Fall vom TESLA Projekt zu bezahlen sein.

Wenn diese Einrichtungen unter der Ägide des TESLA Projektes in Zusammenarbeit mit der Industrie erstellt und betrieben werden, sind gleich mehrere Vorteile für alle Beteiligten offensichtlich.

Für TESLA wäre der ungehinderte und direkte Zugriff auf den Betrieb der Anlagen ein solcher Vorteil. In diesem Fall können die während der Serienproduktion der Resonatoren gewonnene Erkenntnisse rasch und ohne Komplikationen auf die Einstellparameter des Schmelzverfahrens zurückwirken und damit den Gesamtprozess stetig verbessern.

Die direkte Rückführung des Materialverschnitts in den Schmelzprozess wäre ein weiterer Vorteil. Zur Zeit werden bis zu 40 % des Niobmaterials als Verschnitt verbraucht. Die Hersteller nehmen dieses Material bisher nicht zurück. Sie haben dies jedoch für TESLA nicht ausgeschlossen, sondern daraus erklärt sich ein Teil der jüngsten Preisreduzierung.

Nachdem das Niob für TESLA hergestellt wurde, können die Schmelzanlagen ohne größere Änderung zur industriellen Gewinnung von Niob, Tantal, Molybdän oder auch Titan höchster Qualität weiter verwendet werden.

Es ist auch anzunehmen, dass die mehrjährige Betriebserfahrung neue technologische Erkenntnisse zur Gewinnung exakt bestimmter Legierungen auch für den Betreiber der Schmelzanlagen erbringen wird. Erfahrungsgemäß führt eine solche Entwicklung zu neuen Anwendungsfeldern, da bei verringerten Materialkosten neue Produkte mit besseren Eigenschaften bei niedrigeren Preisen möglich werden.

Das gilt dann nicht nur für die supraleitenden Strukturen von Teilchenbeschleunigern, sondern auch für andere anspruchsvolle Anwendungen wie zum Beispiel in der Medizintechnik oder in der chemischen Industrie.

**Mit dem Bau von TESLA könnte als Nebeneffekt eine neue, risikobehaftete Technologie weiter erschlossen und für mittlere Unternehmen verfügbar gemacht werden.**

Der zusätzliche Entwicklungsaufwand und das finanzielle Risiko würden durch den für TESLA notwendigen Bau neuer Schmelzanlagen getragen. Die anschließende kommerzielle Nutzung bliebe den beteiligten Firmen überlassen.

## 10. Zusammenfassung

Die vorliegenden Zahlen sowie verschiedene physikalische Aspekte über die Gewinnung des Niobs für TESLA führen zu einigen grundsätzlichen Erkenntnissen und zu einer subjektiven Schlußfolgerung.

1. Die globale Gewinnung und der industrielle Verbrauch von Niob unterschiedlicher Qualität sind mit **22400 Tonnen** jährlich erheblich größer als der TESLA Bedarf.
2. Der Ausgangsrohstoff des Niobs für TESLA steht somit in großen Mengen und zu langfristig stabilen Preisen von **~75 DM / kg** zur Verfügung.
3. Die aus diesem Rohmaterial für TESLA zu gewinnende Menge Niob kann mit den vorhandenen Anlagen nur bedingt erzeugt oder qualitativ garantiert werden.

Hieraus folgt, dass die erforderliche Menge Niob für TESLA im vorgesehenen Zeitraum nur in speziell für diese Aufgabe erstellte Schmelzanlagen realisiert und über den Projektzeitraum hinweg qualitativ garantiert werden kann.

Aus der vorliegenden Analyse ergeben sich Kosten für das Niob von **400 bis 450 DM / kg**.

Ob dieser Wert erreicht werden kann, hängt vor allem von der weiteren Vorgehensweise ab. Die Optimierung der Verfahrenstechnik im Hinblick auf TESLA könnte zusammen mit interessierten Firmen im Rahmen eines Pilotprojektes in Angriff genommen werden. Wie diese Studie zeigt, können damit nicht nur erhebliche Sparpotentiale für TESLA gewonnen werden, sondern die industrielle Herstellung und die künftige Verfügbarkeit von hochreinem Niob könnten sich nachhaltig verbessern.

Beide Effekte wären gleichwohl sehr wünschenswert.

Danksagung:

Die Autoren möchten den Herren,

Dr. Ing. F. Heisterkamp,	Niobium Products Company, Düsseldorf
Dr. Ing. Chr. Klinkenberg,	Niobium Products Company, Düsseldorf
Dipl. Ing. R. Theile,	Wickeder Westfalenstahl, Wickede
Prof. Dr. W. Goecht,	Institut für internationale technische & wirtschaftliche Zusammenarbeit, RWTH Aachen
Dr. K. Anderson,	H. C. Stark, Goslar
Dr. E. Maedler,	von Ardenne Anlage Technik, Dresden
Dr. M. Blum,	ALD Vacuum Technologies AG, Hanau
Dipl. Ing. J. Klose,	Freiberger NE-Metall GmbH, Freiberg,
Dipl. Ing. P. Böhlke,	Institut für bildsame Formgebung, RWTH Aachen
Dr. H. Reis,	CSM Hermsdorf GmbH, Hermsdorf
Dr. D. Trines,	Deutsches Elektronen Synchrotron DESY, Hamburg

für die zahlreichen, außerordentlich wertvollen Diskussionen und für die spontane Bereitstellung von Informationsmaterialien ihren besten Dank aussprechen.

## 11. Literatur

- [1] R. Brinkmann et al. Technical Design Report of a 500 GeV  $e^+ e^-$  Linear Collider, with integrated X-ray Facility, DESY, März 2001
- [2] Taschenbuch des Metallhandels, 9. Auflage 1997, S. 57-59, Hüthig Verlag, Heidelberg.
- [3] W. Gocht, Metall, 33.Jahrgang, Heft 7, S.774, Juli 1979.
- [4] L. D. Cunningham, Columbium and Tantalum-1998.
- [5] U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Februar 2000.
- [6] Metal Bulletin, 23, Juni 1997, S.11.
- [7] Informationsblatt von NPC GmbH, Düsseldorf, Tochtergesellschaft von CBMM/Brasilien.
- [8] Chr. Klinkenberg, ck@niobium.de, NPC, private Mitteilung.
- [9] F. Scholz, TESLA 95-09, S.30-59, R&D Issues in the Field of Superconducting Cavities, Ed. D. Proch, March 6-8, 1995, DESY.
- [10] T. Carneiro, H.R.S. Moura, Proc. Conf. Electron Beam Welding and Refining, State of the Art 1998, S 110-125, 1998.
- [11] TRI-CITIES today, a tri-city industrial development council (Tridec) publication, Oct. 1998.
- [12] R. A. Bosch, Proc. Conf. Electron Beam Welding and Refining, State of the Art 1990, S 189-207, 1990.
- [13] P. Böhlke, RWTH-Aachen, Inst. für bildsame Formgebung, private Mitteilung.
- [14] C. Cocordonis, Titanium International GmbH, Düsseldorf, private Mitteilung.

## 12. Anhang A: Schmelzanlagen.

Schmelzanlagen -, Betriebs- & Materialkostenabschätzung.			
Objekt	Parameter	Wert	Einheiten
Schmelzanlage	Gesamtmenge Rohstoff ATR Niob 4%AL	<b>1000000</b>	kg
	Zahl der Umschmelzungen	6	fach
	Zu schmelzende Menge	6000000	kg
	Energiebedarf pro Umschmelzung (Kanone)	8	kWh / kg
	Materialverlust Schmelzung # 1	7	%
	Materialverlust Schmelzung # 2	4	%
	Materialverlust Schmelzung # 3	2	%
	Materialverlust Schmelzung # 4	2	%
	Materialverlust Schmelzung # 5	2	%
	Materialverlust Schmelzung # 6	2	%
	Material Ausbeute	81	%
	Verlustmenge beim Umschmelzen	190000	kg
	Gewinnmenge Niob für TESLA Rohlinge	810000	kg TESLA Nb
	Energiebedarf insgesamt	62400000	kWh
	Strompreis spezifisch	0.20	DM / kWh
	Anlagenleistung	3500	kW
	Stromkosten total	<b>12,480,000</b>	DM
Spezielle Einrichtungen, Werkzeuge etc.	<b>3,000,000</b>	DM	
Investition für die Schmelzanlage	<b>50,000,000</b>	DM	
Anlagenbetrieb	Betriebsdauer Schmelzen	13714	h
	Betriebsdauer Rüsten & Anfahren	3429	h
	Gesamtbetriebsdauer	17143	h
	Anlagenbesatzung	10	Mitarbeiter
	Mannstunden	171429	h
	Stundensatz	150	DM / h
	Betriebszeit	714	Tage
	Zahl der Arbeitsplätze	48	Arbeitsplätze
	Wochenarbeitszeit	35	h
	Anlagenersatzteile	1,000,000	DM
	Niob Materialanalysen	1,000,000	DM
	Betriebspersonalkosten	<b>25,714,286</b>	DM
Spezifische Kosten	Materialkosten Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( Weltmarkt )	19	\$/ kg Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Kosten Niobinhalt ( Weltmarkt )	27	\$/ kg Nb
	ATR Niob 4% Al ( Weltmarkt )	35.0	\$/ kg ATR Nb
	Benutzer Währungsfaktor	2.15	DM / \$
	<b>Rohmaterialpreis ATR Niob 4% Al</b>	<b>75.25</b>	<b>DM / kg ATR Nb</b>
	Betriebspersonalkosten spezifisch	31.75	DM / kg
	Stromkosten spezifisch	15.41	DM / kg
	Analysen, Ersatzteile & Sonstiges spez.	6.17	DM / kg
	<b>Schmelzkosten sechsfach, spezifisch</b>	<b>53.33</b>	<b>DM / kg</b>
	Schmelzanlagen Investition spezifisch	65.43	DM / kg
Einzelkosten	Rohmaterialkosten ATR Niob 4% Al	75,250,000	DM
	Schmelzanlagen Investition	53,000,000	DM
	Betriebspersonalkosten	25,714,286	DM
	Stromkosten	12,480,000	DM
	Analysen & Ersatzteile	2,000,000	DM
	Sonstige Posten	3,000,000	DM

## 12. Anhang B: Halbzeuherstellung.

Prozessanalyse zum Schmieden und Walzen von Nioblechen.

Die nachfolgenden Prozesse für Schmieden und Walzen von Nioblechen mit den entsprechenden Wirkungsgraden sind im Bericht über die Fertigstellung des CEBAF Projektes sehr ausführlich beschrieben [12].

Die Kostenfaktoren sind aus Daten von existierenden Walzwerken in Deutschland ermittelt.

Als Ausgangsmaterial dient ein rundes sechsfach umschmolzenes Niob Ingot 305 x 1800 mm, 1180 kg:

- 1 Es wurde kaltgeschmiedet auf 178x178x4000 mm und geschnitten in 4 Stücken 178x178x1000 mit 260 kg. Wirkungsgrad 0,97. Kostenfaktor 4,1 DM / kg.
- 2 Kaltgeschmiedet auf 64x178x 2740 mm und geschnitten in 5 Stücken 64x178x500 mm mit 50 kg. Wirkungsgrad 0,97. Kostenfaktor 4,3 DM / kg.
- 3 20 Stücken geschliffen, gereinigt und gebeizt. Wirkungsgrad 0,95. Kostenfaktor 3,5 DM/kg.
- 4 Vakuum geglüht bei 800°C zwei stundenlang in 2 Chargen mit 10 Stück pro Charge. Kostenfaktor 5,6 DM/kg.
- 5 20 Stück kaltgewalzt auf 15 x 755 x 500. Kostenfaktor 4,2 DM/kg.
- 6 20 Stück kaltgewalzt in gekreuzter Richtung auf 4,5 x 755 x 1400 mm und anschließend geschnitten in 60 Streifen 4,5x 250 x 1400 mm. Wirkungsgrad 0,92. Kostenfaktor 5,6 DM/kg.
- 7 60 Streifen auf Endmaß 3x250 x 2000 mm und 13 kg kaltgewalzt und geschnitten. Wirkungsgrad 0,90. Kostenfaktor 5,6 DM/kg.
- 8 60 Streifen auf 800°C für 2 Stunden in drei Chargen im Vakuum geglüht. Kostenfaktor 7 DM/kg.
- 9 60 Streifen endgewalzt. Kostenfaktor 1 DM/kg.

Der Gesamtwirkungsgrad der Prozesse 1- 9 betrug.  $0,97 \times 0,97 \times 0,95 \times 0,92 \times 0,90 = 0,74$ . Der Gesamtkostenfaktor liegt bei  $4,1 + 4,3 + 3,5 + 5,6 + 4,2 + 5,6 + 5,6 + 7 + 1 = 40,9$  DM / kg.

Die Investitionskosten für die Walzwerkzeuge liegen bei 8 bis 10 Millionen DM und für einen Vakuumofen bei 2 Millionen DM. Daraus resultiert eine Kostenbelastung von 14,26 DM / kg.