

EUR 2993.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

**ANALYSE DER ANLAGEKOSTEN VON KERNKRAFTWERKEN
UND DIE MÖGLICHKEITEN IHRER SENKUNG**

Teil I und II

1966



**Bericht abgefasst bei der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Deutschland**

**Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft
Lehrauftrag Leistungsreaktoren**

Euratom-Vertrag Nr. 020-63-12 ECID

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und die in deren Namen handelnden Personen :

keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind, oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen, oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt;

keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen, oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird in den auf der vierten Umschlagseite genannten Vertriebsstellen

zum Preise von DM 34,-	FF 42,50	FB 425	Lit. 5300	Fl. 50,65
------------------------	----------	--------	-----------	-----------

Es wird gebeten, bei Bestellungen die EUR-Nummer und den Titel anzugeben, die auf dem Umschlag jedes Berichts aufgeführt sind.

Gedruckt von Smeets
Brüssel, Juni 1966

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

EUR 2993.d

ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANTS CONSTRUCTION COSTS AND POSSIBILITIES OF REDUCING THEM - Part I and II

European Atomic Energy Community - EURATOM

Report prepared at the Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

Aachen (Germany)

Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft - Lehrauftrag Leistungsreaktoren

Euratom Contract No. 020-63-12 ECID

Brussels, June 1966 - 332 Pages - 100 Figures - FB 425

A thorough and comprehensive analysis of nuclear power plants construction cost is still very troublesome, because specified cost data are rare and the producers are not very communicative on this point.

The report presented therefore deals with the analysis of direct construction cost of nuclear power plants equipped with well tested reactors, limiting the study to PWRs

EUR 2993.d

ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANTS CONSTRUCTION COSTS AND POSSIBILITIES OF REDUCING THEM - Part I and II

European Atomic Energy Community - EURATOM

Report prepared at the Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

Aachen (Germany)

Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft - Lehrauftrag Leistungsreaktoren

Euratom Contract No. 020-63-12 ECID

Brussels, June 1966 - 332 Pages - 100 Figures - FB 425

A thorough and comprehensive analysis of nuclear power plants construction cost is still very troublesome, because specified cost data are rare and the producers are not very communicative on this point.

The report presented therefore deals with the analysis of direct construction cost of nuclear power plants equipped with well tested reactors, limiting the study to PWRs

EUR 2993.d

ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANTS CONSTRUCTION COSTS AND POSSIBILITIES OF REDUCING THEM - Part I and II

European Atomic Energy Community - EURATOM

Report prepared at the Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

Aachen (Germany)

Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft - Lehrauftrag Leistungsreaktoren

Euratom Contract No. 020-63-12 ECID

Brussels, June 1966 - 332 Pages - 100 Figures - FB 425

A thorough and comprehensive analysis of nuclear power plants construction cost is still very troublesome, because specified cost data are rare and the producers are not very communicative on this point.

The report presented therefore deals with the analysis of direct construction cost of nuclear power plants equipped with well tested reactors, limiting the study to PWRs

and BWRs, while it was hoped to secure cost information about them. The study comprises the cost of nuclear power plants within the $250 \text{ MW}_e - 1200 \text{ MW}_e$ range.

Defining the object of the study, a method of analysis is developed, which is then applied to evaluate the available cost information.

Based on the analysis of construction cost of nuclear power plants being built or planned, relations are developed for the estimation of the cost of construction of nuclear power plants within a certain power range.

The cost of single construction elements, dependent on the installed power of a plant is investigated by detailed analyses, and the possibilities to lower construction cost are discussed.

In conclusion a statement of the results of the detailed analyses is given for six different installed plant powers as well as an estimating of the possibility of reduction of construction cost in the foreseeable future.

and BWRs, while it was hoped to secure cost information about them. The study comprises the cost of nuclear power plants within the $250 \text{ MW}_e - 1200 \text{ MW}_e$ range.

Defining the object of the study, a method of analysis is developed, which is then applied to evaluate the available cost information.

Based on the analysis of construction cost of nuclear power plants being built or planned, relations are developed for the estimation of the cost of construction of nuclear power plants within a certain power range.

The cost of single construction elements, dependent on the installed power of a plant is investigated by detailed analyses, and the possibilities to lower construction cost are discussed.

In conclusion a statement of the results of the detailed analyses is given for six different installed plant powers as well as an estimating of the possibility of reduction of construction cost in the foreseeable future.

and BWRs, while it was hoped to secure cost information about them. The study comprises the cost of nuclear power plants within the $250 \text{ MW}_e - 1200 \text{ MW}_e$ range.

Defining the object of the study, a method of analysis is developed, which is then applied to evaluate the available cost information.

Based on the analysis of construction cost of nuclear power plants being built or planned, relations are developed for the estimation of the cost of construction of nuclear power plants within a certain power range.

The cost of single construction elements, dependent on the installed power of a plant is investigated by detailed analyses, and the possibilities to lower construction cost are discussed.

In conclusion a statement of the results of the detailed analyses is given for six different installed plant powers as well as an estimating of the possibility of reduction of construction cost in the foreseeable future.

EUR 2993.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

**ANALYSE DER ANLAGEKOSTEN VON KERNKRAFTWERKEN
UND DIE MÖGLICHKEITEN IHRER SENKUNG**

Teil I und II

1966



**Bericht abgefasst bei der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Deutschland**

**Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft
Lehrauftrag Leistungsreaktoren**

Euratom-Vertrag Nr. 020-63-12 ECID

ZUSAMMENFASSUNG

Der Mangel an spezifizierten Kostenangaben und die geringe Informationsfreudigkeit der Herstellerfirmen erschweren eine gründliche und umfassende Analyse der Anlagekosten von Kernkraftwerken zur Zeit noch erheblich.

Der vorliegende Bericht beschäftigt sich aus diesem Grunde mit der Analyse der direkten Anlagekosten von Kernkraftwerken mit erprobten Reaktortypen und zwar speziell mit Druck- und Siedewasserreaktoren, da für diese Typen am ehesten Kostenangaben zu beschaffen sind. Untersucht werden die Anlagekosten von Kernkraftwerken im Leistungsbereich zwischen 250 MW_e und 1200 MW_e.

Zunächst werden die Ziele der Untersuchung festgelegt und die Methodik der Analyse ausgearbeitet. Anhand dieser Grundlagen erfolgt dann die Auswertung der zugänglichen Kostendaten.

Ausgehend von der Analyse der Anlagekosten gebauter bzw. geplanter Kraftwerke werden Beziehungen aufgestellt, die die näherungsweise Ermittlung der Anlagekosten von Kernkraftwerken innerhalb eines gewissen Leistungsbereiches gestatten.

In Detailanalysen werden die Kosten einzelner Anlageteile in Abhängigkeit von der Kraftwerksleistung untersucht und die Verbilligungsmöglichkeiten diskutiert.

Zum Schluss erfolgt eine Zusammenstellung der Ergebnisse dieser Detailanalysen für 6 verschiedene Kraftwerksnennleistungen und die Abschätzung der in nächster Zukunft möglichen Kostensenkungen.

Inhaltsverzeichnis

	Teil I	Seite
1	Allgemeine Bemerkungen zur Zielsetzung der Untersuchung und dem Inhalt des Berichtes	1
1.1	Das ursprüngliche Untersuchungsprogramm	1
1.2	Die im Laufe der Untersuchung notwendig gewordenen Änderungen des ursprünglichen Untersuchungsprogramms	2
1.3	Überblick über den Inhalt des vorliegenden Berichtes	4
2	Systematik der Analyse	6
2.1	Allgemeines	6
2.2	Nomenklatur	6
2.2.1	Definition der Anlagekosten	6
2.2.2	Aufteilung der direkten Anlagekosten	7
2.2.3	Aufteilung der direkten Anlagekosten für ein Kernkraftwerk mit Siedewasser - Reaktor	7
2.2.4	Aufteilung der direkten Anlagekosten für ein Kernkraftwerk mit Druckwasser - Reaktor	10
2.3	Möglichkeiten der Analyse	12
2.4	Verwendete Methode der Kostenanalyse zur Ermittlung von Kostenfunktionen	14
2.4.1	Darstellung der Kostenfunktion im linearen Netz	15
2.4.2	Darstellung der Kostenfunktion im doppelt - logarithmischen Netz	18
2.4.3	Verfahren zur Ermittlung der Kostenfunktionen	24

2.4.3.1	Berechnung der freien Konstanten nach einem Ausgleichsverfahren	24
2.4.3.2	Berechnung der freien Konstanten aus einem eindeutigen Gleichungssystem	28
2.4.3.3	Berechnung der Kostenfunktion bei unvollständigen Daten	28
2.5	Methoden zur Bestimmung der Anlagekosten eines Kernkraftwerkes gegebener Anordnung und Leistung	30
2.5.1	Die globale Ermittlung der Gesamtanlagekosten	32
2.5.2	Die globale Bestimmung der Anlagekosten der einzelnen Systeme und ihre Integration zu den Gesamtanlagekosten	33
2.5.3	Die Ermittlung der Kosten einzelner Komponenten und ihre Integration zu den Gesamtanlagekosten	35
2.6	Preisänderungen bei Änderung der Gesteungskosten (Preisgleitformel)	37
3	Ergebnisse der Analyse	39
3.1	Ermittlung globaler Abschätzungsformeln für die Gesamtanlagekosten in Abhängigkeit von der Kraftwerksleistung	41
3.1.1	Abschätzungsformeln für Kernkraftwerke mit Siedewasser - Reaktoren	42
3.1.2	Abschätzungsformeln für Kernkraftwerke mit Druckwasser - Reaktoren	51
3.2	Globalschätzungsformeln für die Anlagekosten von Systemen und Integration der Kosten zu den Gesamtanlagekosten	53
3.2.1	Abschätzungsformeln für Kernkraftwerke mit Siedewasser - Reaktoren	59

3.2.2	Abschätzungsformeln für Kernkraftwerke mit Druckwasser - Reaktoren	74
3.3	Analyse der Kosten einzelner Anlagekomponenten	91
3.3.1	Analyse ausgewählter Komponenten des nuklearen Teils	93
3.3.1.1	Untersuchungen zum Reaktordruckgefäß	94
3.3.1.1.1	Der Innendurchmesser des Reaktordruckgefäßes als Funktion der Leistung	94
3.3.1.1.2	Die Höhe des Reaktordruckgefäßes von Siedewasser - Reaktoren als Funktion der Leistung und des Innendurchmessers	117
3.3.1.1.3	Die Höhe des Reaktordruckgefäßes von Druckwasser - Reaktoren	124
3.3.1.1.4	Die Wandstärke von Reaktordruckgefäßen	124
3.3.1.1.5	Beziehungen zur Abschätzung der Reaktordruckgefäßkosten	131
3.3.1.1.6	Zusammenhang zwischen der Einflußgröße L_1 und dem Gewicht des Reaktordruckgefäßes	138
3.3.1.1.7	Montage- und Transportkosten	141
3.3.1.1.8	Entwicklungstendenzen, Verbilligungsmöglichkeiten, Grenzgrößen	143
3.3.1.2	Die Kosten der Druckgefäßeinbauten	146
3.3.1.3	Die Steuerstäbe nebst Antriebseinrichtungen	151
3.3.1.3.1	Abschätzung der Steuerstabanzahl bei Siedewasser - Reaktoren	151
3.3.1.3.2	Abschätzung der Steuerstabanzahl bei Druckwasser - Reaktoren	153
3.3.1.3.3	Die Kosten der Steuerstäbe und Steuerstabantriebe	156
3.3.1.3.4	Entwicklungstendenzen, Verbilligungsmöglichkeiten	164

I n h a l t s v e r z e i c h n i s

	Teil II	Seite
3.3.1.4	Die Pumpen des Umwälzkreises	168
3.3.1.4.1	Die Grenzgrößen des Einheitskühlkreislaufes und die Zahl der Kühlkreisläufe je Reaktor	179
3.3.1.4.2	Anlagekosten, Grenzgrößen und Entwicklungstendenzen der Umwälzpumpen	182
3.3.1.5	Die Dampferzeuger	187
3.3.1.5.1	Die Anlagekosten der Dampferzeuger	187
3.3.1.5.2	Begrenzungen der Dampferzeugergröße	193
3.3.1.6	Die Anlagekosten des Druckhaltesystems	195
3.3.1.7	Die Kosten der elektrotechnischen Ausrüstung des nuklearen Dampferzeugersystems	197
3.3.1.8	Die Kosten der Instrumentierung des nuklearen Dampferzeugersystems	201
3.3.1.8.1	Die Kosten der Instrumentierung bei Siedewasser - Reaktoren	201
3.3.1.8.2	Die Kosten der Instrumentierung bei Druckwasser - Reaktoren	205
3.3.1.9	Die Kosten des Systems für Wasserchemie und Volumenregelung	209
3.3.1.10	Hilfs- und Nebenanlagen des nuklearen Dampferzeugungssystems	211
3.3.1.10.1	Die Kosten der Hilfssysteme von Siedewasser - Reaktor - Anlagen	211
3.3.1.10.2	Die Kosten der Nebenanlagen von Siedewasser - Reaktor - Anlagen	215

3.3.1.10.2.1	Die Kosten des Reaktorumschließungsgehäuses von Siedewasser - Reaktor - Anlagen	215
3.3.1.10.2.2	Die Abmessungen, die optimale Dichte und die Kosten der Reaktorabschirmung	223
3.3.1.10.2.3	Abmessungen und Anlagekosten des Druckabbausystems	226
3.3.1.10.2.4	Die Kosten der restlichen Nebenanlagen des nuklearen Dampferzeugungssystems	233
3.3.1.10.3	Die Kosten der Hilfs- und Nebenanlagen des nuklearen Dampferzeugungssystems von Druckwasser - Reaktor - Anlagen	236
3.3.1.11	Die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen des nuklearen Dampferzeugungssystems; Transport- und Montagekosten	240
3.3.2	Kostenanalyse ausgewählter Komponenten des konventionellen Kraftwerkteiles	241
3.3.2.1	Die Anlagekosten des Turbo - Generator - Satzes	243
3.3.2.2	Die Anlagekosten der Rohrleitungen, Armaturen, Vorwärmer und Pumpen	254
3.3.2.3	Die Kosten der Kondensatreinigungsanlage	259
3.3.2.4	Die Kosten der Kühlwasseranlagen	261
3.3.2.5	Die Kosten der maschinentechnischen Nebenanlagen	264
3.3.2.6	Die Anlagekosten der elektrotechnischen Anlagen des konventionellen Kraftwerkteiles	267
3.3.2.7	Die Kosten der Instrumentierung des konventionellen Kraftwerkteiles	272
3.3.3	Kostenanalyse ausgewählter Komponenten des Bauteils	274

3.3.3.1	Die Kosten des Maschinenhauses	275
3.3.3.2	Die Kosten des Reaktorgebäudes	283
3.3.3.3	Die Kosten der restlichen Gebäude	287
3.3.3.4	Globalabschätzung der Kosten des Bauteils	289
3.4	Zusammenstellung der direkten Anlagekosten	291
3.4.1	Berechnung der Kosten einzelner Anlagekomponenten	292
3.4.2	Zusammenstellung der direkten Anlagekosten von Kraftwerken mit Siedewasser - Reaktoren	302
3.4.3	Zusammenstellung der direkten Anlagekosten von Kraftwerken mit Druckwasser - Reaktoren	306
4	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	310
4.1	Die Anlagekosten von Kernkraftwerken mit Siede- und Druckwasser - Reaktoren nach dem derzeitigen Entwicklungsstand	311
4.2	Möglichkeiten und Umfang der Anlagekostensenkung	317
4.2.1	Möglichkeiten und Umfang der Anlagekostensenkung bei Kernkraftwerken mit Siedewasser - Reaktoren	319
4.2.2	Möglichkeiten und Umfang der Anlagekostensenkung bei Kernkraftwerken mit Druckwasser - Reaktoren	325
4.3	Schlußbemerkungen	331

1. Allgemeine Bemerkungen zur Zielsetzung der Untersuchung
und dem Inhalt des Berichtes

Gemäß dem Vertrag zwischen der Europäischen Gemeinschaft und der Technischen Hochschule Aachen ist das Ziel dieser Studie, durch systematische Analyse der einzelnen Bereiche eines Kernkraftwerkes und ihrer technischen Entwicklungstendenzen Möglichkeiten zur Senkung der Anlagekosten zu ermitteln. Dabei sollen die Untersuchungen auf Kraftwerke beschränkt bleiben, die mit Siedewasser - bzw. Druckwasserreaktoren im Dampferzeugersystem arbeiten. Die Einheitsgrößen wurden auf 250; 500 und 1000 MW_{el} festgelegt.

Bei der Formulierung des Untersuchungsprogramms war davon ausgegangen worden, daß für diese Kraftwerkstypen konkrete Angaben erhältlich seien. Leider hat es sich bei der Durchführung der Untersuchungen herausgestellt, daß dies nicht ganz zutrifft. Diese Tatsache zwingt zu Abänderungen des ursprünglichen Untersuchungsprogramms.

1.1. Das ursprüngliche Untersuchungsprogramm

Das ursprüngliche Untersuchungsprogramm sah für jeden der oben erwähnten Reaktortypen und jede Einheitsgröße folgende **Untersuchungsschritte vor:**

- 1.) Auswahl der Bauteile und Systeme, bei denen Preisänderungen die Anlagekosten des Kraftwerkes wesentlich beeinflussen.
- 2.) Ermittlung der Art und des Umfanges der Einsparungsmöglichkeiten durch Verbesserung einzelner Komponenten.
- 3.) Ermittlung der Art und des Umfanges der Einsparungsmöglichkeiten durch Anwendung einer Serienfertigung einzelner Anlagekomponenten.
- 4.) Ermittlung der optimalen Kombination der verschiedenen Systeme je Reaktor.
- 5.) Ermittlung der kostenoptimalen Integration der verschiedenen Systeme zum Kraftwerk mit geforderter Gesamtleistung.

Manuskript erhalten am 27. April 1966.

- 6.) Die Untersuchungsergebnisse werden so zusammengefaßt, daß die kostenmäßige Auswirkung der Variation der einzelnen Faktoren festgestellt werden kann.

Dieses Untersuchungsprogramm läßt sich in dieser Form und dem Umfang in der zur Verfügung stehenden Zeit nur durchführen, wenn ein umfangreiches, lückenloses Datenmaterial zur Verfügung steht. Da sich die Untersuchungen auf europäische Verhältnisse gründen sollen, sind amerikanische Daten, soweit sie vorliegen, wenn überhaupt, nur mit Vorsicht zu verwenden. Die in Europa gebauten, bzw. im Bau befindlichen Reaktoren der zu untersuchenden Typen liegen ausnahmslos an der unteren Grenze des zu analysierenden Bereiches. Außerdem haben sie mehr oder weniger den Charakter von Versuchsatomkraftwerken, so daß ihre Kostendaten nicht uneingeschränkt verwendet werden können. Zwar liegen bei den einschlägigen Firmen Studien und Projektierungen von größeren Einheiten vor, jedoch sind infolge der Wettbewerbssituation Kostendaten nur schwer und wenn überhaupt, nicht in dem erforderlichen Umfang zu erhalten. Das trifft sowohl für den nuklearen, als auch für den konventionellen Teil des Kraftwerkes zu. Zudem haben selbst die Firmen bei der Abschätzung der Anlageteile Schwierigkeiten, da für Anlagen dieser Größenordnung kaum Erfahrungen vorliegen.

1.2. Die im Laufe der Untersuchung notwendig gewordenen Änderungen des ursprünglichen Untersuchungsprogramms

Aus den oben genannten Gründen nahm die Beschaffung der notwendigen Daten einen großen Teil der zur Verfügung stehenden Zeit in Anspruch und aus eben diesen Gründen konnte nur ein Bruchteil der erforderlichen Daten beschafft werden. Das besondere Augenmerk mußte unter diesen Umständen auf die Ermittlung brauchbarer Extrapolationsbeziehungen gelegt werden, um die Lücken mit einigermaßen wahrscheinlichen Werten ausfüllen zu können. Das neue Untersuchungsprogramm hat seinen Schwerpunkt deshalb in der Kostenanalyse, d.h. im besonderen in der Ermittlung

von Kostenfunktionen und Einflußgrößen.*

Die im ursprünglichen Programm unter Punkt 4.) und 5.) vorgesehene optimale Kombination der verschiedenen Systeme, bzw. ihre kostenoptimale Integration zum Kraftwerk mit geforderter Gesamtleistung läßt sich nur mit Hilfe einer Optimierungsrechnung hinsichtlich verschiedener Parameter durchführen. Dazu müssen die Kostenfunktionen der einzelnen Komponenten in Abhängigkeit dieser Parameter bekannt sein. Bei der Aufschlüsselung der Anlagekosten nach einzelnen Komponenten stellte sich jedoch heraus, daß mit Ausnahme des Turbo-Generator-Satzes, - keine als geschlossene Einheit anzusehende Komponente einen dominierenden Einfluß auf die gesamten Anlagekosten hat, so daß einer Optimierungsrechnung eine Vielzahl kleiner Komponenten zugrunde gelegt werden müßte. Das bisher vorhandene Material reicht jedoch nicht aus, um die Kostenfunktionen all dieser Komponenten zu ermitteln. Aus diesem Grund erscheint im augenblicklichen Stadium der Untersuchung eine optimale Kombination, bzw. eine kostenoptimale Integration als wenig sinnvoll. An ihrer Stelle wird eine Integration der analysierten Komponenten nach geeigneten Verfahren zum Gesamtkraftwerk versucht, deren Optimalität höchstens diskutiert, nicht aber mathematisch zwingend nachgewiesen werden kann.

Das gleiche gilt für die Einsparungsmöglichkeiten durch Verbesserung einzelner Komponenten bzw. durch Anwendung einer Serienfabrikation zur Erstellung verschiedener Komponenten. Wegen des verhältnismäßig geringen Anteils der einzelnen Komponenten an den Anlagekosten lassen sich durch einzelne Verbesserungen keine spektakulären Erfolge erzielen. Es ist vielmehr eine zähe Kleinarbeit erforderlich, um durch eine Reihe von Verbesserungen, sinnvollen Vereinfachungen, Abbau unnötiger Sicherheitsfaktoren, Klärung technologischer Probleme usw. eine nennenswerte Senkung der Anlagekosten zu erreichen. Diese Untersuchungen lassen sich jedoch nur bei einer detaillierten Kenntnis

* Argument der Kostenfunktion; Definition siehe Abschn. 2.3

der Kostenstruktur sowie der technischen Probleme mit einiger Aussicht auf Erfolg durchführen. Da diese Kenntnisse, falls vorhanden, nur den einschlägigen Firmen zur Verfügung stehen, lassen sich derartige Einflüsse nur abschätzen und diskutieren. Ein genaueres Bild der vorhandenen Möglichkeiten ließe sich evtl. durch Vergabe von Studienarbeiten an die in Frage kommenden Firmen gewinnen.

1. 3. Überblick über den Inhalt des vorliegenden Berichtes

Der Bericht besteht im wesentlichen aus 2 Teilen; einem allgemeinen Teil (Kapitel 2. f. f.), der die Systematik der Analyse beschreibt, und einem Teil (Kapitel 3. f. f.), der die Ergebnisse der Untersuchungen enthält. Zu dem letzteren ist folgendes zu sagen:

Die Darstellung der Ergebnisse gliedert sich im Prinzip in drei Hauptabschnitte folgenden Inhaltes

- 3.1 Analyse der Gesamtanlagekosten mit dem Ziel einer globalen Abschätzung der Anlagekosten.
- 3.2 Analyse der Kosten der einzelnen Systeme der Anlage und ihre Zusammensetzung zu den Gesamtanlagekosten, wobei als Systeme die Anlagekomplexe entsprechend der Aufteilung Kapitel 2.2.2. verstanden werden soll.
- 3.3 Analyse der Kosten einzelner Komponenten der Anlage und ihre Zusammensetzung zu den Gesamtanlagekosten. Als Komponenten werden die Bestandteile der Systeme entsprechend der Aufteilung in Kapitel 2.2.3. bzw. 2.2.4. bezeichnet.

Die zu den Punkten 3.1 und 3.2 erzielten Ergebnisse können für Siedewasserreaktoren als recht gut bezeichnet werden. Das für Druckwasserreaktoren zur Verfügung stehende Datenmaterial ist jedoch recht dürftig, da in der Bundesrepublik selbst noch kein Leistungsreaktor dieses Typs gebaut wurde, und die in den USA ausgeführten Bauten nur die untere Grenze des Leistungsbereiches dieser Untersuchung erreichen. Dieser Datenmangel macht sich bei den Untersuchungen natürlich recht unangenehm bemerkbar.

Während die Kostenabschätzungen in den Abschnitten 3.1 und 3.2 lediglich die Tendenz der direkten Anlagekosten summarisch aufzeigen sollen, ermöglicht die differenzierte Untersuchung unter 3.3 eine etwas individuellere Zusammensetzung der Kraftwerke und bietet damit eine Möglichkeit, die Auswirkungen der Verbilligungen einzelner Komponenten auf die direkten Anlagekosten abzuschätzen.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, daß es sich nur um Richtwerte handeln kann, da die Konstruktion bzw. Komposition eines noch nicht geplanten Kraftwerkes und damit auch seine Anlagekosten nicht exakt voraussagbar sind. Außerdem wird der Preis einer Anlage häufig durch die Marktsituation in stärkerem Maße beeinflußt als durch die technischen Details.

Die vorliegende Untersuchung befaßt sich lediglich mit den „direkten Anlagekosten“ im Sinne der Definition in Abschnitt 2.2.1.. Die indirekten Anlagekosten sind weitgehend von Standortfragen, von steuerlichen und finanztechnischen Gegebenheiten sowie von der Bauzeit und dem Kapitalbedarf während dieser Zeit abhängig. Ihre genaue Berechnung entzieht sich daher einer allgemein gültigen, pauschalen Behandlung und sollte zweckmäßigerweise unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten erfolgen. Der Vollständigkeit halber werden die indirekten Anlagekosten jedoch in der Zusammenfassung durch pauschale Zuschläge berücksichtigt.

2. Systematik der Analyse

2.1. Allgemeines

Bei den Besprechungen mit der deutschen Industrie über die Anlagekosten von Kernkraftwerken stellte sich heraus, daß es weitgehend an einer einheitlichen Begriffsbestimmung und Sprachregelung fehlt. Es war daher erforderlich, bei jeder Unterredung zunächst Begriffe zu klären. Eine vordringliche Aufgabe wäre es, zur Vermeidung von Mißverständnissen eine wenigstens für den europäischen Raum verbindliche Sprachregelung auf dem Gebiet der Anlagekosten von Kernkraftwerken zu treffen.

Für den Rahmen dieser Arbeit sollen im folgenden die verwendeten Begriffe zusammengestellt werden.

2.2. Nomenklatur

2.2.1. Definition der Anlagekosten

Die Anlagekosten kann man in die direkten und die indirekten Anlagekosten aufteilen.

Für ein Kernkraftwerk mit leichtwassermoderiertem und -gekühltem Reaktor werden zu den direkten Anlagekosten die Kosten für die Konstruktionsteile der Reaktor - Anlage, der Turbinen - Generator - Anlage mit Wärmekreis, der elektrischen Hilfsanlagen mit Maschinentransformator, der verschiedenen Kraftwerkseinrichtungen gerechnet. Außerdem zählen hierzu die Kosten für alle Gebäude, nicht aber die Kosten für die Brennstoffausstattung und Brennstoffreserve.

Die indirekten Anlagekosten umfassen die Kosten des Baugrundes, die Bauleitungs- und -aufsichtskosten, die Steuern und Zinsen während der Bauzeit, die Verwaltungs- und Allgemeinkosten, die Inbetriebnahmekosten sowie Zuschläge für unvorhergesehene Ausgaben.

In dieser Arbeit werden nur die direkten Anlagekosten von Kernkraftwerken mit leichtwassermoderierten und - gekühlten Reaktoren (Siedewasser - und Druckwasser - Reaktor) analysiert. Die in-

direkten Anlagekosten lassen sich durch prozentuale Zuschläge aus den direkten Kosten ermitteln.

Die Analyse der direkten Anlagekosten lehnt sich an folgende Aufteilung in Kostengruppen an.

2.2.2. Aufteilung der direkten Anlagekosten.

Für Druck- und Siedewasserreaktoren werden die direkten Anlagekosten in drei Hauptgruppen unterteilt

- 01. Nuklearer Teil
 - 01.1. Nukleares Dampferzeugungssystem
 - 01.2. Nukleare Nebenanlagen
- 02. Konventioneller Teil
 - 02.1. Konventioneller Kraftwerksteil
 - 02.2. Konventionelle Nebenanlagen
- 03. Bauteil

Eine weitere Aufgliederung wird für die beiden Reaktortypen getrennt aufgestellt.

2.2.3. Aufteilung der direkten Anlagekosten für ein Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor.

- 01. Nuklearer Teil
 - 01.1. Nukleares Dampferzeugungssystem
 - 01.1.1. Druckgefäß
 - 2. Einbauten
 - 3. Hilfssysteme
 - 4. Steuerstäbe mit Antrieben
 - 5. Umwälzkreis (mit Pumpen ohne Antriebe)
 - 6. Elektrotechnischer Teil
 - 7. Instrumentierung
 - 8. Rest (Isolierung, Anstrich, **Reini-**
gung, Labor, u.s.w.)
 - 0 1.2. Nukleare Nebenanlagen
 - 01.2.1. Abwasseraufbereitung
 - 2. Abgasanlage
 - 3. Feststofflager
 - 4. Reaktorumschließungsgehäuse (bzw. Druck-
abbausystem)

5. Brennstoffhandhabung (ohne Transportbehälter)
 6. Lufttechnische Anlagen
 7. Hebezeuge
02. Konventioneller Teil
- 02.1. Konventioneller Kraftwerksteil
 - 02.1.1. Turbosatz (Turbine, Kondensator, Generator, Umleitstation)
 2. Elektrotechnischer Teil
 3. Instrumentierung
 4. Vorwärmanlage
 5. Pumpen
 6. Kühlwassereinlaufeinrichtung
 7. Kondensatreinigung
 - 02.2. Konventionelle Nebenanlagen
 - 02.2.1. Hebezeuge
 2. Heizungsanlagen
 3. Druckluftanlage
 4. Werkstatteinrichtung
 5. Zusatzwasseraufbereitungsanlage (Vollentsalzung)
03. Bauteil
- 03.1. Reaktor- und Aufbereitungsgebäude, Feststofflager (mit Abschirmung, ohne Druckabbausystem)
 2. Maschinenhaus
 3. Turbinenfundamente
 4. Rest der Gebäude (Vorwärmerhaus usw.)
 5. Kühlwasseranlagen (innerhalb des Zaunes)
 6. Bauliche Neben- und Außenanlagen
 7. Baustelleneinrichtung
 8. Bauhilfsarbeiten und Verschiedenes

Für eine genauere Kalkulation wäre eine wesentlich ausführlichere Aufteilung erforderlich. Für diese Arbeit soll jedoch nicht noch weiter unterteilt werden.

Einige Anlageteile bedürfen noch einer Erläuterung:
Zu den nuklearen Hilfssystemen zählen die zum Reaktorbetrieb unmittelbar benötigten Einrichtungen (z.B. Primär-

kreisreinigung). Unter dem Begriff Einbauten sind die Gitterplatten, der Kernmantel, die Dampfabscheider und - trockner, Steuerstabführungsrohre, Kernabstützung usw. zusammengefaßt.

Der elektrotechnische Teil des nuklearen Dampferzeugungssystems umfaßt die Pumpenantriebe und die Antriebe der Absperrorgane mit Zubehör.

Zur Brennstoffhandhabung gehören z. B. auch die Auskleidung des Brennelementlagerbeckens und die Lagergestelle; außerdem die Brennelementwechseleinrichtung.

Zum Turbo - Generator - Satz wird die Turbine, der Generator, die Erregermaschine, der Kondensator mit Zubehör, die Umleitstation sowie die Schmier- und Kühleinrichtung mit der ersten Ölausstattung gerechnet.

Zum elektrotechnischen Teil mit Instrumentierung gehören die Maschinen- und Eigenbedarfstransformatoren, die Motoren für die Pumpen des konventionellen Teils und die Schaltanlagen (ohne Freiluftschaltanlage).

Unter dem Begriff „Rest der Gebäude“ werden Vorwärmgebäude, Werkstattgebäude, Verwaltungsgebäude, Kühlwasserpumpenhaus, Pfortnerhaus, Feststofflagerhaus usw. zusammengefaßt.

Die baulichen Neben- und Außenanlagen sind Transformatorenfundamente, begehbare Kabelkanäle, gärtnerische Anlagen usw..

Diese Aufteilung ist weitgehend willkürlich und sehr stark von der jeweiligen Konzeption einer Anlage abhängig. Insbesondere variiert sie für den Bauteil bei verschiedenen Anlagen sehr stark, da man im Sinne einer optimalen Integration und im Bestreben nach einer kompakten Bauweise die relative Lage der einzelnen Systeme zueinander von Anlage zu Anlage ändert.

Da in dieser Arbeit nur ähnliche Kraftwerke verglichen werden sollen, kann von den genannten Unterschieden abgesehen und die getroffene Aufteilung beibehalten werden.

2.2.4. Aufteilung der direkten Anlagekosten für ein Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor.

- 01. Nuklearer Teil
 - 01.1. Nukleares Dampferzeugungssystem
 - 01.1.1. Druckgefäß
 - 2. Einbauten
 - 3. Hilfssysteme
 - 4. Regelstäbe mit Antrieben
 - 5. Umwälzkreis (Rohre mit Hauptkühlmittelumwälzpumpen **ohne Antriebe**)
 - 6. Dampferzeuger
 - 7. Druckhaltesystem
 - 8. Elektrotechnischer Teil
 - 9. Instrumentierung
 - 10. Rest
 - 01.2. Nukleare Nebenanlagen
 - 01.2.1. System für Wasserchemie und Volumenregelung
 - 2. System für Abfallagerung und Aufbereitung
 - 3. Reaktorumschließungsgehäuse (Stahlzylinder)
 - 4. Brennstoffhandhabung (ohne Transportbehälter)
 - 5. Lufttechnische Anlagen
 - 6. Abgassystem
 - 7. Hebezeuge
- 02. Konventioneller Teil
 - 02.1. Konventioneller Kraftwerksteil
 - 02.1.1. Turbosatz
 - 2. Elektrotechnischer Teil
 - 3. Instrumentierung
 - 4. Vorwärmanlage
 - 5. Pumpen
 - 6. Kühlwassereinlaufeinrichtung
 - 7. Kondensatreinigung
 - 02.2. Konventionelle Nebenanlagen
 - 02.2.1. Hebezeuge
 - 2. Heizungsanlage
 - 3. Druckluftanlage
 - 4. Werkstatteinrichtung

5. Zusatzwasseraufbereitungsanlage (Vollentsalzung)
03. Bauteil
- 03.1. Reaktorgebäude (mit Gründung, Betoneinbauten, Gebäudeausrüstung)
 2. Nukleare Hilfs- und Nebenanlagengebäude
 3. Maschinenhaus
 4. Turbinenfundamente
 5. Rest der Gebäude (Konventionelle Hilfs- und Nebenanlagengebäude)
 6. Bauliche Neben- und Außenanlagen
 7. Baustelleneinrichtung
 8. Bauhilfsarbeiten und Verschiedenes.

2.3. Möglichkeiten der Analyse

Will man eine Analyse von Kostendaten vornehmen, so muß zunächst einmal definiert werden, welches Ziel diese Analyse haben soll, d. h. nach welchen Gesichtspunkten analysiert werden soll. Für die Durchführung dieser Studie erscheint ein Vorgehen in zwei Richtungen am zweckmäßigsten.

- 1) Analyse der vorhandenen Kostenangaben mit dem Ziel, die Kostenfunktionen der einzelnen Anlagekomponenten zu ermitteln.
- 2) Ermittlung des prozentualen Anteils der einzelnen Komponentenkosten an den gesamten direkten Anlagekosten.

Unter einer Kostenfunktion soll im folgenden die Abhängigkeit der Kosten K von einer Einflußgröße L verstanden werden

$$K = f(L),$$

wobei die Einflußgröße L selbst eine Funktion der Leistung und anderer technischer Parameter sein kann

$$L = (N, x_1, \dots, x_n).$$

Im einfachsten Fall ist die Einflußgröße mit der Leistung identisch

$$L = N.$$

Beim Vorgehen nach 1) muß also zunächst für jede Anlagenkomponente eine geeignete Einflußgröße festgelegt und dann die Abhängigkeit der Kosten dieser Komponente von der Einflußgröße bestimmt werden.

Die möglichst genaue Ermittlung der prozentualen Kostenaufteilung erweist sich in mehrfacher Hinsicht als vorteilhaft. Zunächst läßt sich der Einfluß der Komponentenkosten auf die gesamten Anlagekosten besser erkennen; weiter ermöglicht diese Aufteilung in Verbindung mit den Untersuchungen unter 1) Rückschlüsse auf die gesamten Anlagekosten, zum anderen lassen die Kenntnisse der gesamten Anlagekosten in Verbindung mit der prozentualen Aufteilung Schlüsse auf die Kosten einzelner Komponenten zu. Außerdem bietet diese Darstellung den Vorteil, daß eine prozentuale

Kostenaufteilung von den Herstellerfirmen leichter zu erhalten ist als absolute Kosten.

Mit dieser Darstellung ist allerdings auch die Gefahr der Verwendung von Prozentangaben mit unterschiedlichen Bezugswerten verbunden.

In den folgenden allgemeinen Betrachtungen zu den Untersuchungsmethoden soll zunächst vorausgesetzt werden, daß die erforderlichen Daten zur Verfügung stehen.

2.4 Verwendete Methoden der Kostenanalyse zur Ermittlung von Kostenfunktionen

Das Ziel dieser Analyse ist die Ermittlung des Kostenverlaufes K als Funktion einer sogenannten Einflußgröße L

$$K = f(L) \qquad 2.4.1$$

aus vorhandenen Daten.

Die Abhängigkeit der Einflußgröße von der Kraftwerksnettoleistung und anderen technischen Parametern muß für jede Komponente besonders ermittelt werden. Dieser Ermittlungsvorgang läßt sich nicht für alle Komponenten verbindlich in allgemeiner Form darstellen, da er für die einzelnen Komponenten unterschiedlich ist und sich im wesentlichen aus ihrer technischen Funktion ergibt.

In einigen Fällen ist die Einflußgröße mit der Kraftwerksnettoleistung identisch. In den meisten Fällen muß diese Identität jedoch als erste Näherung benutzt werden, da der Umfang der uns zugänglichen Daten eine derart differenzierte Untersuchung nicht ermöglicht.

Die Güte einer aus gegebenen Daten ermittelten Kostenfunktion hängt wesentlich von der richtigen Wahl der Einflußgröße ab. Das läßt sich recht gut an den Abbildungen 3.3.14.2 und 3.3.14.4 des Abschnitts 3.3.1.4 erkennen. Die Anlagekosten einer Pumpe sind z. B. eine Funktion der Durchsatzmenge Q bzw. des Durchsatzgewichtes G

$$K_P = f(G)$$

In Abbildung 3.3.14.2 ist das Kühlmitteldurchsatzgewicht G einiger gebauter Reaktoren in Abhängigkeit von einer geeigneten Einflußgröße L_2 (Gleichung 3.3.14.7) aufgetragen. Die eingezeichneten Punkte lassen sich zwanglos und eindeutig durch eine Gerade darstellen. Die Abbildung 3.3.14.4 enthält die gleichen Daten als Funktion der Kraftwerksnettoleistung. Aus dieser Darstellung eine eindeutige Abhängigkeit herzuleiten, ist nicht sehr ratsam.

Die Angaben einer Kostenfunktion gelten nur für „ähnliche“ Komponenten, d. h. für Komponenten gleicher Bauart, die sich lediglich durch ihre Größe bzw. ihre Leistung unterscheiden.

2.4.1. Darstellung der Kostenfunktion im linearen Netz

Stellt man die Kosten in Abhängigkeit einer geeigneten Einflußgröße im linearen Netz dar, so lassen sich zwei grundsätzlich verschiedene Kostenanteile unterscheiden. Der eine Anteil ist unabhängig von der Einflußgröße und soll im folgenden als Festkostenanteil K_f bezeichnet werden; der andere ist eine Funktion der Einflußgröße und wird als variabler Kostenanteil K_v bezeichnet

$$K = K_v + K_f \quad 2.41.1$$

$$K_v = f_1(L) \quad 2.41.2$$

In vielen Fällen ist der variable Kostenanteil der Einflußgröße proportional. Dann ergibt sich folgender Zusammenhang

$$K_v = a_1 L \quad 2.41.3$$

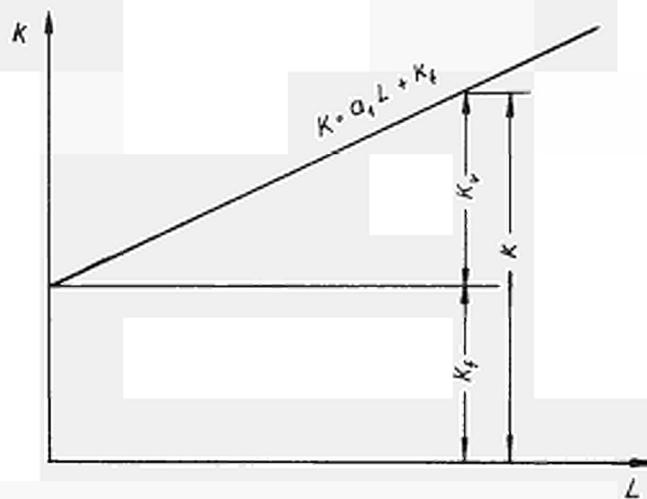


Abb. 2.41.1

Die Größe der Konstante K_f ist in diesen Fällen allein maßgebend für die Größendegression der spezifischen Kosten k . Unter den spezifischen Kosten k sollen die Kosten K bezogen auf die Einflußgröße L verstanden werden.

$$k = \frac{K}{L} = a_1 + \frac{K_f}{L} \quad 2.41.4$$

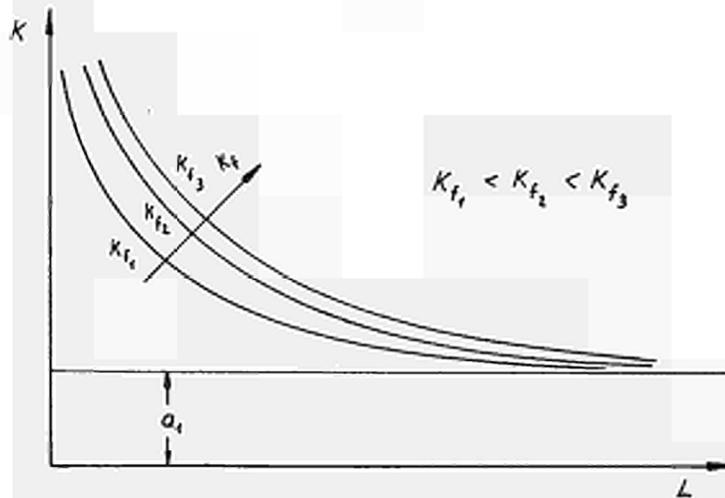


Abb. 2.41.2

Der Koeffizient a_1 stellt die Asymptote der Gleichung 2.41.4 dar. Aus der Abbildung 2.41.2 ist der Einfluß von K_f im Prinzip zu erkennen. (Der Pfeil deutet die Zunahme von K_f an.)

Dieses vereinfachte Modell gilt bei den empirischen Kostenkurven nur für große Werte der Einflußgröße; im Bereich kleinerer Werte nehmen die Kosten unterproportional *) (degressiv) zu (siehe Abbildung 2.41.3). Bezeichnet L_p denjenigen Wert der Einflußgröße, bei der der degressive Kostenverlauf in den proportionalen übergeht, dann läßt sich die empirische Kostenfunktion K (Gleichung 2.41.1 und 2.41.2) wie folgt schreiben

$$K = a_1 L^m + a_0 \quad 2.41.5$$

mit

$$m < 1$$

$$m = 1$$

$$a_0 = K_f$$

}

im Bereich

$$L < L_p$$

$$L > L_p$$

*) Kölbel und Schulze: Projektierung und Vorkalkulation in der chemischen Industrie Springer/Berlin 1960 S. 238 (4.05 Die Bestimmung der Kapitalbedarfsdegression)

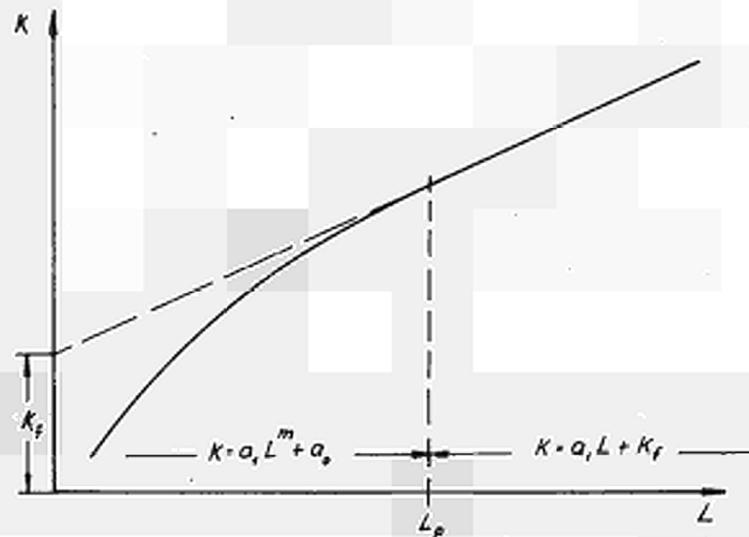


Abb. 2.41.3

Wegen des empirischen Charakters der Kostenfunktion (Gleichung 2.41.5) lassen sich über die Größe des Wertes L_p nur anhand von umfangreichem Datenmaterial Aussagen für spezielle Kostenkurven machen.

Aus Gleichung 2.41.5 ergibt sich für die spezifischen Kosten

$$k = \frac{K}{L} = \frac{a_1}{L^{1-m}} + \frac{a_0}{L} \quad 2.41.6$$

mit

$$m < 1$$

$$m = 1$$

$$a_0 = K_f$$

im Bereich
 $L < L_p$

$L > L_p$

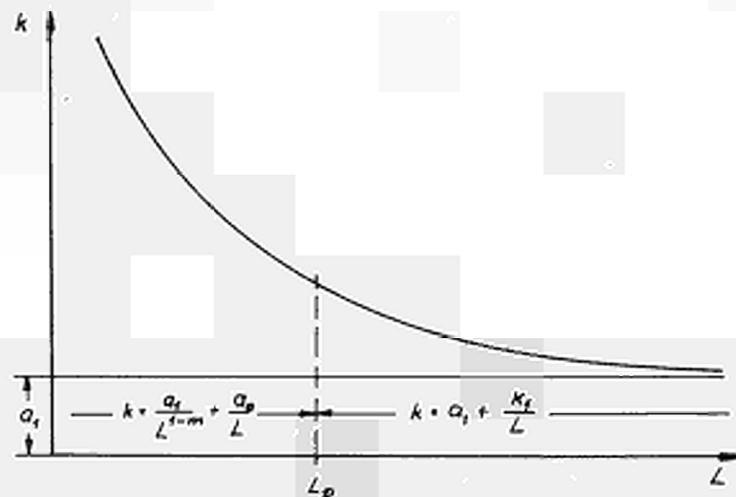


Abb. 2.41.4

Neben diesen anschaulichen linearen Kostenkurven ist auch noch die doppelt - logarithmische Darstellung der Kosten üblich. Diese Darstellungsweise bietet besonders im nichtlinearen Teil der Kostenkurve (siehe Abbildung 2.41.3 Bereich $L < L_p$) Vorteile.

2.4.2. Darstellung der Kostenfunktion im doppelt - logarithmischen Netz

Die allgemeine lineare Funktion

$$y = a_1 x + a_0 \quad 2.42.1$$

erhält in der doppelt - logarithmischen Darstellung folgende Form

$$\log y = \log (a_1 x + a_0) \quad 2.42.2$$

$$\log y = \log x + \log \left(a_1 + \frac{a_0}{x} \right) \quad 2.42.2a$$

Trifft man über die Größenordnung der Koeffizienten a_1 und a_0 keine Vereinbarungen und verfolgt die Werte der Funktion y über einen großen Bereich des Argumentes x , dann ergibt sich im Prinzip folgender Verlauf der Funktion

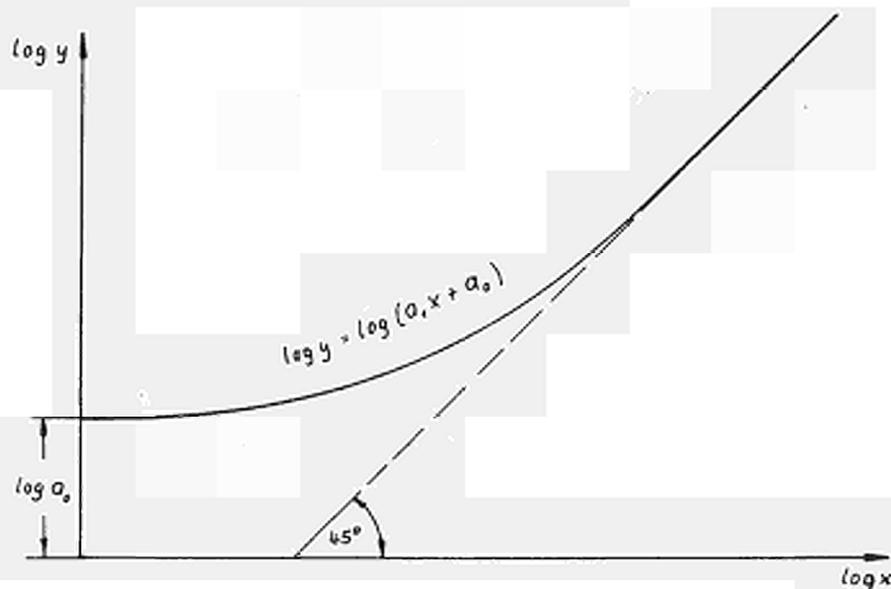


Abb. 2.42.1

Diese Kurve lässt sich stückweise beliebig genau durch eine Gerade wiedergeben. Eine Gerade im doppelt - logarithmischen

System entspricht aber einer Exponentialfunktion im linearen Netz

$$\log y = m \log x + \log c \quad 2.42.3$$

Daraus ergibt sich:

$$y = cx^m \quad 2.42.4$$

Es bleibt nun zu untersuchen, welche Grenzgrößen der Exponent m annehmen kann und welchen Einfluß die Koeffizienten a_1 und a_0 ausüben. Die Grenzgrößen des Exponenten m erhält man aus folgender Grenzwertbetrachtung:

Das Minimum des Exponenten ergibt sich aus dem Grenzübergang:

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \log y &= \lim_{x \rightarrow 0} \log (a_1 x + a_0) \\ &= \log a_0 \quad \text{daraus folgt} \end{aligned}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} y = a_0 = a_0 x^0 = \text{const.}$$

und

$$m_{\min} = 0$$

Das Maximum des Exponenten erhält man aus

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} \log y &= \lim_{x \rightarrow \infty} \log x + \lim_{x \rightarrow \infty} \log \left(a_1 + \frac{a_0}{x} \right) \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \log x + \log a_1 \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \log a_1 x . \end{aligned}$$

Daraus folgt

$$\lim_{x \rightarrow \infty} y = \lim_{x \rightarrow \infty} a_1 x^1$$

und

$$m_{\max} = 1.$$

Die Exponenten der stückweise stetigen Approximation liegen also in den Grenzen

$$0 \leq m \leq 1$$

2.42.5

Die Darstellung in dieser allgemeinen Form bietet keinen Vorteil gegenüber der linearen Darstellung. Beachtet man jedoch, daß das Argument x - hier stellvertretend für die Einflußgröße L eingeführt - bei den zur Diskussion stehenden Problemen wesentlich größer als Null ist, dann stellt sich heraus, daß unter dem zusätzlichen Einfluß der Koeffizienten a_1 und a_0 bei praktisch vorkommenden Fällen nur kleine Abschnitte der Gesamtkurve zu approximieren sind. Diese Approximation erfordert je nach Lage des Gebietes auf der Kurve und dem betrachteten Einflußgrößenbereich nur die Berechnung von 1 bis maximal 3 Geradenstücken.

Diese Betrachtungen sollen im folgenden an einigen Abschätzungen erklärt werden:

Ist $a_1 x \gg a_0$

dann ist a_0 gegenüber $a_1 x$ zu vernachlässigen und die Beziehung 2.42.2 vereinfacht sich zu

$$\log y \approx \log (a_1 x)$$

$$y \approx a_1 x$$

d.h. der Exponent liegt in der Nähe von 1.

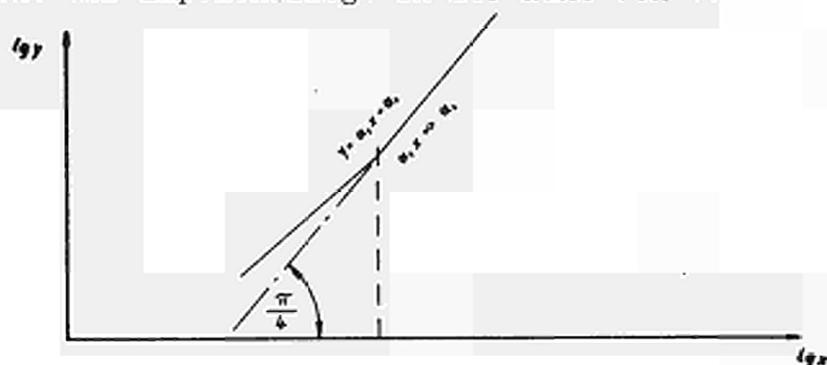


Abb. 2.42.2

Die genaue Approximation würde etwa folgende Gleichung liefern:

$$y = a_1 x^m \quad m = 0,8 \dots 0,85 \dots 0,9 .$$

Für

$$a_0 \leq a_1 x \leq 10a_0$$

ergibt sich etwa folgende Approximation

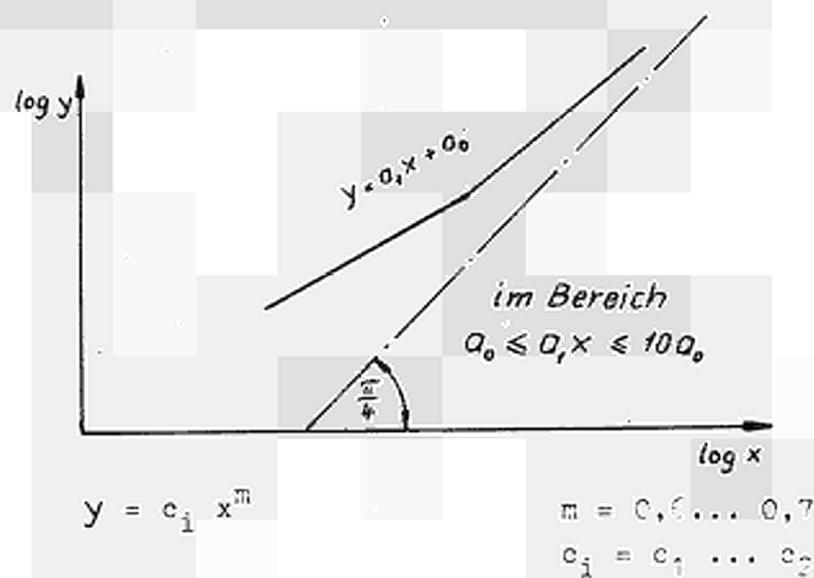


Abb. 2.42.3

Ist umgekehrt

$$a_1 x \ll a_0 ,$$

dann läßt sich in Gleichung 2.42.2 der Term $a_1 x$ gegenüber dem Term a_0 vernachlässigen, d.h. y ist weitgehend unabhängig von x

$$y \approx a_0 = \text{const.}$$

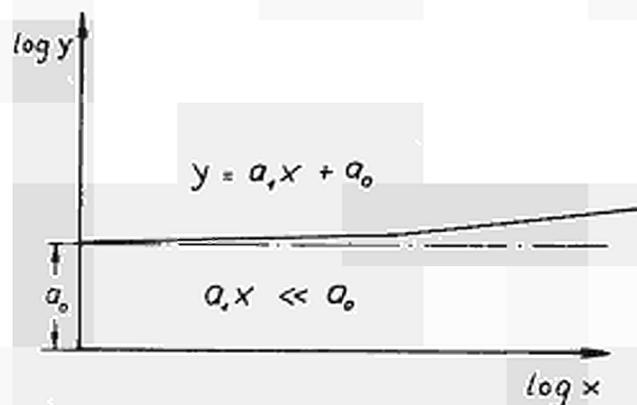


Abb. 2.42.4

Daraus ergibt sich die Näherung

$$y = c_i x^m \quad m = 0,15 \dots 0,2$$
$$c_i = c_3 \dots c_4$$

Der Vorteil dieser Methode kommt besonders bei dem nichtlinearen Kurvenverlauf in der Form der Gleichung 2.41.5 zur Geltung.

Allgemein geschrieben

$$y = a_1 x^m + a_0 \quad 2.42.6$$

in doppelt-logarithmischer Darstellung

$$\log y = \log (a_1 x^m + a_0) \quad 2.42.7$$

In nahezu allen praktischen Fällen ist hier

$$a_0 \ll a_1 \quad \text{und}$$
$$x > 1$$

so daß a_0 gegenüber dem Term $a_1 x^m$ vernachlässigt werden kann

$$\log y - \log (a_1 x^m) = m \log x + \log a_1 \quad 2.42.8$$

$$y \approx a_1 x^m \quad 2.42.9$$

Der nichtlineare Teil der Kostenkurve ist in dieser Darstellung wesentlich einfacher zu approximieren.

Ein weiterer Vorteil der hier beschriebenen Darstellung der Kostenfunktion ist die Möglichkeit, anhand von Vergleichswerten relative Kosten zu bestimmen. Die Funktion 2.42.4 mit festen Werten für c und m gilt nur für einen bestimmten Bereich.

$$x_1 \leq x \leq x_2$$

In diesem Intervall sei z.B. der Funktionswert y_1 an der Stelle x_1 gegeben

$$y_1 = c x_1^m$$

der Funktionswert y an der Stelle x sei gesucht

$$y = c x^m$$

dann lässt sich y aus y_1 und x_1 wie folgt berechnen

$$y = y_1 \left(\frac{x}{x_1} \right)^m \quad 2.42.10 a$$

=====

Diese Beziehung auf die für die Kostenfunktion eingeführten Größen übertragen lautet:

$$K = K_1 \left(\frac{L}{L_1} \right)^m \quad 2.42.10$$

=====

Für den Verlauf der spez. Kosten ergibt sich hieraus:

$$k = \frac{K}{L} = \frac{K_1}{L} \left(\frac{L}{L_1} \right)^m = \frac{K_1}{L_1} \frac{L_1}{L} \left(\frac{L}{L_1} \right)^m$$

$$k = k_1 \left(\frac{L_1}{L} \right)^{1-m} \quad 2.42.11$$

=====

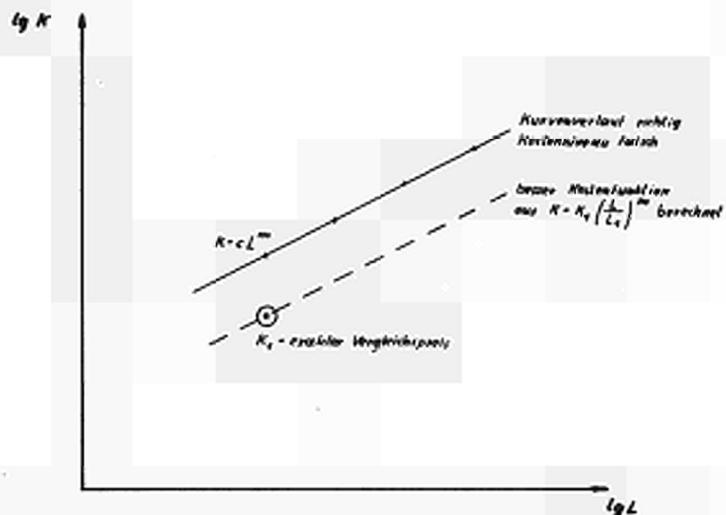
Hierbei ist natürlich streng darauf zu achten, daß der Vergleichswert demselben Gültigkeitsbereich wie der zu berechnende angehört.

Neben der bequemen Extrapolation bietet das Verfahren die Möglichkeit, mit Hilfe eines exakten Vergleichswertes eine verhältnismäßig genaue Extrapolation zu erhalten, selbst wenn der absolute Preis nach der Beziehung

$$K = c L^m \quad 2.42.12$$

zwar in der Größe falsch, der Kurvenverlauf in dem Bereich jedoch richtig wiedergegeben wurde. (Beispiel siehe Abb. 2.42.5)

Abb. 2.42.5
Korrektur eines falschen Kosten-
niveaus bei rich-
tigem Kurvenver-
lauf durch besse-
ren Vergleichswert



Dieser Fall kann z.B. eintreten wenn die Kostenfunktion aus Daten berechnet wurde, die zwar in der Größe falsch waren, den Verlauf der Kostenfunktion jedoch richtig wiedergaben.

2.43 Verfahren zur Ermittlung der Kostenfunktionen

Bei der numerischen Ermittlung der Kostenfunktionen muß zwischen mehreren Fällen unterschieden werden; dabei wird angenommen, daß die Einflußgröße bereits festgelegt wurde.

- a) Es sind mehr Daten vorhanden als für die Bestimmung der freien Konstanten notwendig sind.
- b) Es sind gerade soviel Daten vorhanden wie für die Berechnung der freien Konstanten erforderlich sind.
- c) Es sind zwar soviel Daten vorhanden wie für die Ermittlung der freien Konstanten erforderlich sind, es ist aber nicht zu entscheiden ob sie demselben Bereich der Kostenkurve angehören oder nicht.
- d) Es sind weniger Daten vorhanden als für die Berechnung der freien Konstanten notwendig sind.

2.431 Berechnung der freien Konstanten nach einem Ausgleichsverfahren.

Ausgleichsverfahren sind immer dann anzuwenden, wenn mehr unabhängige Gleichungen zur Berechnung der Unbekannten vorliegen

als Unbekannte vorhanden sind, wie z.B. im Fall a). Je mehr Werte vorliegen, umso genauer fällt das Ergebnis dieser Ausgleichsrechnung aus.

Im vorliegenden Fall soll als Ausgleichsverfahren das Gauß'sche Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate verwendet werden.

$$v = f(a_0, \dots, a_r, \dots, a_p, x)$$

mit

$$r = 0, 1, 2, \dots, p$$

sei die Funktion, durch die die gegebene Funktion

$$y = f(x)$$

approximiert werden soll. Der Fehler zwischen dem wahren Funktionswert und dem approximierten an der Stelle x_r ist dann:

$$\epsilon_r = v_r - y_r \quad 2.431.1$$

Nach der Fehlerquadratmethode wird nun gefordert, daß

$$\sum_{r=0}^n \epsilon_r^2 = \sum_{r=0}^n (v_r - y_r)^2 = \phi(a_0, \dots, a_r, \dots, a_p) = \text{Ext.} \quad 2.431.2$$

wobei

$$r = 0, 1, 2, \dots, n$$

$$p < n$$

$$r = 0, 1, 2, \dots, p$$

Für ein Extremum gelten folgende notwendige Bedingungen:

$$\frac{\partial \phi}{\partial a_r} = 0 \quad 2.431.3$$

für alle $r = 0 \dots p$

Diese Bedingungen liefern $p + 1$ Bestimmungsgleichungen für die $p + 1$ freien Konstanten a_r .

Die Funktion v hat in dem hier zu behandelnden Fall die Form

$$y = a_1 x + a_0 \quad 2.431.4$$

Diese allgemeine Form gilt sowohl für die Approximation im linearen wie im doppelt-logarithmischen Netz, nur haben die Größen y , x , a_1 und a_0 darin unterschiedliche Bedeutung. Wendet man die Beziehung 2.431.3 auf die Gleichung 2.431.4 an, dann ergibt sich:

$$\frac{\partial \phi}{\partial a_0} = 0 : \quad 2 \sum_{\nu=0}^n (v_\nu - y_\nu) \frac{\partial v_\nu}{\partial a_0} = 0$$

mit $\frac{\partial v_\nu}{\partial a_0} = 1$ erhält man:

$$\sum_{\nu=0}^n (v_\nu - y_\nu) = 0 \quad 2.431.5$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial a_1} = 0 : \quad 2 \sum_{\nu=0}^n (v_\nu - y_\nu) \frac{\partial v_\nu}{\partial a_1} = 0$$

Aus Gleichung 2.431.4 berechnet sich

$$\frac{\partial v_\nu}{\partial a_1} = x_\nu$$

damit ergibt sich

$$\sum_{\nu=0}^n (v_\nu - y_\nu) x_\nu = 0 \quad 2.431.6$$

Führt man Gleichung 2.431.4 in die Gleichungen 2.431.5 und 2.431.6 ein und formt etwas um, so ergibt sich das Bestimmungsgleichungssystem für a_0 und a_1 :

$$\sum_{\nu=0}^n x_\nu a_1 + n a_0 = \sum_{\nu=0}^n y_\nu \quad 2.431.5 \text{ a}$$

$$\sum_{\nu=0}^n x_\nu^2 a_1 + \sum_{\nu=0}^n x_\nu a_0 = \sum_{\nu=0}^n x_\nu y_\nu$$

oder in Matrixschreibweise:

$$\begin{pmatrix} \sum_{\nu=0}^n x_\nu & n \\ \sum_{\nu=0}^n x_\nu^2 & \sum_{\nu=0}^n x_\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{\nu=0}^n y_\nu \\ \sum_{\nu=0}^n x_\nu y_\nu \end{pmatrix}$$

2.431.7

Als Lösung des Systems ergibt sich daraus:

$$a_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} \quad 2.431.8$$
$$a_0 = \frac{\Delta_0}{\Delta} \quad 2.431.9$$

Wobei Δ die Determinante der Koeffizientenmatrix, und Δ_1 bzw. Δ_0 die entsprechende Unterdeterminante der erweiterten Koeffizientenmatrix darstellt.

Je nach dem, ob im linearen oder doppelt-logarithmischen Netz approximiert werden soll, ist die Gleichung verschieden zu interpretieren.

Im linearen Netz bedeutet:

$$y = a_1 x + a_0$$
$$K = a_1 L + a_0$$

=====

im doppelt-logarithmischen Netz dagegen:

$$y = a_1 x + a_0$$
$$\log K = a_1 \log L + \log a_0$$
$$K = a_0 L^{a_1}$$

=====

Die Approximation des nichtlinearen Teiles ist wegen des nicht-bekanntem Exponenten m (Gleichung 2.41.5) recht schwierig. Trifft jedoch die auf Seite 23 gemachte Annahme bezüglich des konstanten Teiles der Funktion zu, d.h. daß er sehr viel kleiner als der variable ist, dann läßt sich für den ganzen nichtlinearen Teil die aus der logarithmischen Darstellung gewonnene Beziehung (Gleich. 2.42.4)

$$K = a_0 L^m$$

verwenden.

2.432. Berechnung der freien Konstanten aus einem eindeutigen Gleichungssystem

Stimmt die Zahl der Daten mit der Zahl der freien Konstanten genau überein, dann läßt sich ein eindeutiges Bestimmungsgleichungssystem angeben. Dabei muß aber eindeutig zu entscheiden sein, ob diese Daten auch dem gleichen Geltungsbereich angehören. Es darf z.B. nicht ein Teil der Daten dem proportionalen, ein anderer Teil dem unterproportionalen Teil der Kostenkurve angehören. Bei linearer Approximation im linearen bzw. doppelt-logarithmischen Netz sind zwei Punkte erforderlich.

$$a_1 x_1 + a_0 = y_1$$

$$a_1 x_2 + a_0 = y_2$$

Aus diesem Gleichungssystem lassen sich die beiden Konstanten a_1 und a_0 berechnen.

Die Interpretation der Gleichung und der Konstanten erfolgt wie unter 2.431.

Die Approximation des nichtlinearen Kurventeiles der Kostenkurve im linearen Netz (Abb. 2.41.3 Bereich $L < L_p$) wird am besten im doppelt-logarithmischen Netz durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Rechnung sind im allgemeinen wesentlich schlechter als die einer Ausgleichsrechnung, da die vorliegenden Daten mit Fehlern behaftet sein können, die die Kostenfunktion erheblich verfälschen. In diesem Fall empfiehlt sich eine Kontrolle nach den im folgenden Abschnitt angegebenen Methoden.

2.433. Berechnung der Kostenfunktion bei unvollständigen Daten.

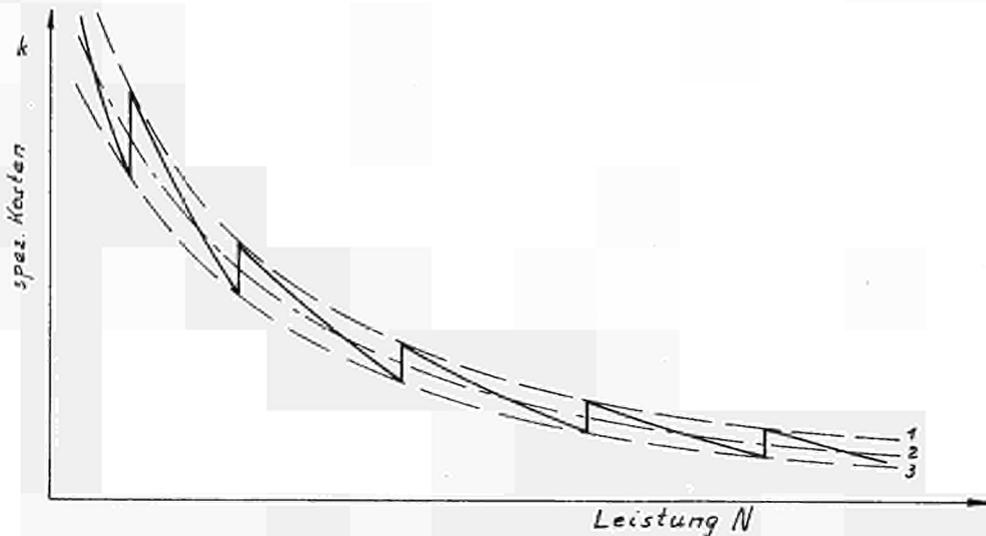
Liegen für die Bestimmung der Kostenfunktion weniger Daten vor als für die Ermittlung der freien Konstanten erforderlich sind, oder gehören die Daten verschiedenen Bereichen der Kostenfunktion an, so lassen sich nicht alle freien Konstanten bestimmen. Ein Teil der freien Konstanten muß in diesem Fall **entweder**

anderen Untersuchungen entnommen oder aufgrund allgemeiner Überlegungen geschätzt werden.

Dieses Verfahren empfiehlt sich jedoch auch in solchen Fällen, bei denen die Zahl der Daten zur Bestimmung der Konstanten gerade ausreicht, da sich auf diese Weise grobe Fehler vermeiden lassen.

2.5. Methoden zur Bestimmung der Anlagekosten eines Kernkraftwerkes gegebener Anordnung und Leistung.

Die Ermittlung einer so komplexen Größe, wie sie die Anlagekosten eines Kernkraftwerkes darstellt, ist natürlich mit außerordentlichen Schwierigkeiten verbunden. Die Forderung der Ähnlichkeit im Sinne der Ähnlichkeitsmechanik, die für eine Darstellung der Komponentenkosten wesentlich war, ist hier natürlich nicht zu erfüllen und kann daher nicht aufrecht erhalten werden.



A. 2.5.1.

Der Begriff "Ähnliches Kraftwerk" muß daher zunächst einmal neu definiert werden.

Bei einem "Ähnlichen Kraftwerk" im Sinne der Ähnlichkeitsmechanik müßten sich sämtliche Komponenten mit der Auslegungsleistung "Ähnlich" verhalten. Das ist aber nur in gewissen Grenzen möglich. Ist eine Komponente, z.B. der Umwälzstromlauf des Reaktors, bei einer Grenzleistung angelangt, kann man bei einem Kraftwerk mit einer größeren Auslegungsleistung diese Komponente mehrfach vorhanden sein. In einem solchen Punkt ist die Ähnlichkeit - im strengen Sinne des Wortes - gestört; in der Kostenkurve wird ein Sprung entstehen (siehe Abb. 2.5.1.). In Abb. 2.5.1. sind die Kurven zwischen zwei Sprüngen die stetige Funktionen dargestellt worden. Würde man mit der Analyse hier noch weiter ins De-

tail gehen, dann ergäben sich auch in diesen Kurven aus ähnlichen Gründen Unstetigkeiten.

Von "ähnlichen Kraftwerken" im strengen Sinne kann also bei Kraftwerken in einem so großen Leistungsbereich wie ihn der zu untersuchende darstellt (250 ... 1000 MWe) keine Rede sein. Unter einem "ähnlichen Kraftwerk" soll daher im folgenden ein Kraftwerk "ähnlicher" Konzeption, d.h. eine Kombination "ähnlicher" Komponenten, verstanden werden.

Aus den obigen Ausführungen ist zu erkennen, daß die Genauigkeit der Kostenermittlung eine Frage des Aufwandes ist. Nimmt man gewisse Ungenauigkeiten in Kauf, dann reicht eine globale Abschätzung, wobei man Abschätzungen bezüglich einer oberen Grenze (Kurve 1 in Abb. 2.5.1), eines Mittelwertes (Kurve 2 in Abb. 2.5.1) und eine untere Grenze (Kurve 3 in Abb. 2.5.1) unterscheidet.

Für eine grobe Abschätzung der Anlagekosten ist diese Methode ganz gut geeignet. Die genaue Kenntnis der "Mikrostruktur" der Kostenkurve ist durch eine entsprechend detaillierte Analyse der Komponentenkosten zu erhalten. Dazu sind jedoch bereits genaue, ins Detail gehende Konstruktionszeichnungen für das gesamte Kraftwerk erforderlich. Eine solche Untersuchung würde die im Rahmen dieser Arbeit möglichen Aufwendungen bei weitem übersteigen. In dieser Studie werden daher die Untersuchungen nach folgenden drei Genauigkeitsstufen durchgeführt:

- a) Globale Ermittlung der Gesamtanlagekosten
- b) Globale Bestimmung der Anlagekosten der einzelnen Systeme und ihre Integration zu den Gesamtanlagekosten
- c) Ermittlung der Kosten der maßgebenden Komponenten, Bestimmung der Systemkosten durch entsprechende Zuschläge und Integration zu den Gesamtanlagekosten.

In den folgenden Abschnitten werden die Methoden näher erläutert.

2.5.1 Die globale Ermittlung der Gesamtanlagekosten.

Ausgehend von den Darstellungen der Anlagekosten im linearen und im doppelt-logarithmischen Netz als Funktion der Kraftwerksnettleistung werden die mittleren Anlagekosten durch folgende Funktionen approximiert:

Lineare Darstellung
$$\frac{K}{[\text{DM}]} = a_1 \frac{N}{[\text{MWe}]} + \frac{K_f}{[\text{DM}]} \quad 2.51.1$$

(siehe Gl.2.41.1. u.2.41.3)

logarithm. Darstellung
$$\frac{K}{[\text{DM}]} = c \left(\frac{N}{[\text{MWe}]} \right)^m \quad 2.51.2$$

(siehe Gl.2.42.12)

bzw. bei Verwendung einer Vergleichsanlage
$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 2.51.2 \text{ a}$$

(siehe Gl.2.42.10)

wobei die Gleichungen 2.51.1 und 2.51.2 als "zugeschnittene Größengleichungen" geschrieben wurden. K_0 und N_0 in Gleichung 2.51.2 a sind die Daten einer entsprechenden Vergleichsanlage.

Die Ermittlung der Konstanten a_1 , c , K_f und m erfolgt - je nach Zahl der vorhandenen Daten - nach einer der unter 2.43 f.f. beschriebenen Methoden.

Die Gleichung 2.51.2 a findet auch bei der Abschätzung der Anlagekosten konventioneller Kraftwerke Verwendung. Die dort gebräuchlichen Exponenten^{*} liegen bei

$$m = 0,6 \dots 0,7 \dots 0,8$$

Die spez. Anlagekosten ergeben sich aus den Gleichungen 2.51.1 und 2.51.2 wie folgt:

$$k = \frac{K}{N}$$

*) H. Ehring in „Moderne Dampfkraftwerke“ S. 44 VDI - Verlag, Düsseldorf / Ricard siehe Fußnote Seite 35 / dorf 1961

K. H. Schüller in „Komb. Dampf-Gas-Prozesse“ BBC-Nachr.41(1959)

$$\frac{k}{[\text{DM/kWe}]} = \frac{a_1 \cdot 10^{-3}}{[\text{DM/kWe}]} + \frac{K_f \cdot 10^{-3}}{[\text{DM}]} \cdot \frac{[\text{MWe}]}{N} \quad 2.51.3$$

$$\frac{k}{[\text{DM/kWe}]} = c \cdot 10^{-3} \left(\frac{[\text{MWe}]}{N} \right)^{1-m} \quad 2.51.4$$

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{N_0}{N} \right)^{1-m} \quad 2.51.4 \text{ a}$$

2.5.2 Die globale Bestimmung der Anlagekosten der einzelnen Systeme und ihre Integration zu den Gesamtanlagekosten.

Wie für die ganze Anlage, so kann man auch für ihre einzelnen Systeme globale Kostenabschätzungen treffen. Zu diesem Zweck sei die ganze Anlage in 3 Systeme unterteilt:

- a) das nukleare Dampferzeugungssystem
- b) der konventionelle Kraftwerksteil
- c) die restlichen Anlagen

Unter der Position c) - restliche Anlagen - sind der Bauteil, sowie die nuklearen und konventionellen Nebenanlagen zusammengefaßt.

Für jedes dieser Systeme soll der Kostenverlauf abhängig von der Systemleistung in folgender Form angegeben werden:

$$K_s = K_{0,s} \left(\frac{N_s}{N_{0,s}} \right)^{m_s} \quad 2.52.1$$

Die Kosten der gesamten Anlage setzen sich dann aus der Summe der Kosten der einzelnen **Systeme zusammen:**

$$K_A = \sum_{s=1}^n K_s \quad 2.52.2$$

wobei n die Zahl der einzelnen Systeme bedeutet.

Ist es aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen erforderlich oder wünschenswert einzelne Systeme mehrfach auszulegen - etwa 2 Turbinen von einer gewissen Grenzleistung ab - dann werden die Systeme entsprechend ihrer Anzahl in der Summation mehrfach aufgeführt. Dabei ist davon ausgegangen, daß der Kostenverlauf des konventionellen Kraftwerksteiles sich im wesentlichen nach der Turbine richtet, die ca 50% des konventionellen Teils ausmacht. Werden 2 Turbinen benötigt, dann wächst auch der Aufwand im konventionellen Kraftwerksteil nahezu um den Faktor 2. Das gleiche gilt für das nukleare Dampferzeugersystem beim Einsatz mehrerer Reaktoren je Kraftwerksblock.

Die Nebenanlagen werden hingegen von der Zahl der beiden ersten Systeme ziemlich unabhängig sein und nur entsprechend der Leistung wachsen.

Die Integration der Kosten der drei Systeme zu den Gesamtanlagekosten ergibt:

$$K_A = K_B + K_{nD} + K_{kK} \quad 2.52.2a$$

Die Indizes haben folgende Bedeutung:

kK = konventioneller Kraftwerksteil

nD = nukleares Dampferzeugersystem

B = Bauteil und Rest

$$K_A = K_{oB} \left(\frac{N}{N_o} \right)^{m_1} + Z_R K_{o,nD} \left(\frac{N_R}{N_{o,R}} \right)^{m_2} + Z_T K_{o,kK} \left(\frac{N_T}{N_{o,T}} \right)^{m_3}$$

2.52.3

Z_R = Zahl der Reaktoren je Kraftwerksblock

Z_T = Zahl der Turbinen je Kraftwerksblock

Erweitert man die Terme der rechten Seite der Gleichung 2.52.3 mit den Gesamtkosten $K_{o,A}$ der Vergleichsanlage, dann erhält man:

$$K_A = K_{O,A} \left[p_{O,B} \left(\frac{N}{N_O} \right)^{m_1} + p_{O,nD} Z_R \left(\frac{N_R}{N_{O,R}} \right)^{m_2} + p_{O,kK} Z_T \left(\frac{N_T}{N_{O,T}} \right)^{m_3} \right] \quad 2.52.4$$

Darin bedeuten die

$$p_{O,s} = \frac{K_{O,s}}{K_{O,A}} \quad s = B ; nD ; kK \quad 2.52.5$$

die Kostenanteile der Komponente s an den Gesamtkosten $K_{O,A}$ der Vergleichsanlage.

Die Darstellung der Gesamtanlagekosten in Form der Gleichung 2.52.4 für konventionelle Kraftwerke geht auf Vorschläge von J. RICARD ¹⁾ zurück.

Sind die Daten einer Vergleichsanlage bekannt, so lassen sich die Anlagekosten einer vergleichbaren ("ähnlichen") Anlage mit Hilfe der Gleichung 2.52.4 näherungsweise berechnen. Dabei wird das Bild der Kostenfunktion schon etwas realistischer, als das nach Gleichung 2.51.2 a ermittelte, da mehr Daten der zu berechnenden Anlage berücksichtigt werden. So ist z.B. ein deutlicher Sprung in der Kostenkurve zu verzeichnen, wenn von einer Turbinenanlage auf 2 Turbinenanlagen übergegangen wird (siehe Diagr.3.21.3 Seite 69).

2.5.3 Die Ermittlung der Kosten einzelner Komponenten und ihre Integration zu den Gesamtanlagekosten

Sollen die Anlagekosten genauer ermittelt werden, dann wird eine Unterteilung der Systeme in einzelne Komponenten erforderlich. Deren Kosten werden ermittelt und zu den Gesamtanlagekosten zusammengefügt. Zu diesem Zweck soll **als Beispiel von der Unterteilung in 2.2.3 und 2.2.4 ausgegangen werden.**

1) J.RICARD: "Concentration des puissance dans la production d'energie thermique" Trans. 4th World Power Conf. 1952 Vol. III p. 1195

Sieht man sich diese Aufteilung genauer an, dann gibt es nur recht wenige allgemein faßbare Komponenten, der Rest besteht aus Sammelposten, die sich einer allgemeinen Beurteilung entziehen und nur an Hand genauer Konstruktionspläne zu erfassen wären.

Um trotzdem zu einem einigermaßen brauchbaren Ergebnis zu kommen, wird folgender Weg eingeschlagen:

- 1) Bestimmung der Kosten der als geschlossene Einheiten abzugrenzenden Anlagekomponenten - wie z. B. das Druckgefäß, die Steuerstabantriebe, die Pumpen der Umwälzkreisläufe - in Abhängigkeit von der Leistung bzw. einer Einflußgröße *)
- 2) parallel dazu Ermittlung einer möglichst genauen prozentualen Aufschlüsselung der Anlagekosten auf die einzelnen Anlagekomponenten und deren Änderung in Abhängigkeit von der Leistung
- 3) Bestimmung der Kosten der nicht als geschlossene Einheit abzugrenzenden Anlagekomponenten - wie z. B. Rohrleitungen und Armaturen, Instrumentierung usw. - mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse in 1) und 2)

Die Ermittlung der Kostenfunktionen der ausgewählten Komponenten unter 1) setzt die Ermittlung der Hauptabmessungen dieser Komponenten in Abhängigkeit von der Leistung und die Wahl der Einflußgröße voraus. Da diese Untersuchungen für jede Anlagekomponente individuell verschieden sind, lassen sie sich nicht in ein allgemeines Schema pressen. Daher soll die entsprechende Untersuchungsmethode bei der Behandlung der einzelnen Komponenten im Kapitel 3 f. f. erläutert werden.

Zum Punkt 3) ist zu sagen, daß sich mit Hilfe der Ergebnisse von 1) und 2) die Anlagekosten abschätzen lassen und damit unter Verwendung der entsprechenden Ergebnisse in 2) Rückschlüsse auf die Kosten der restlichen Komponenten möglich sind.

*) Definition siehe Abschnitt 2.3

2.6. Preisänderungen bei Änderung der Gestehungskosten

(Preisgleitformeln)

Der Preis P eines Anlageteils kann als Summe der einzelnen Kosten K für seine Herstellung, z.B. Material-, Lohn- und Maschinenkosten, und einem Gewinnzuschlag G folgendermaßen dargestellt werden:

$$P = G + K_1 + K_2 + \dots + K_\nu + \dots + K_n = G + \sum_{\nu=1}^n K_\nu$$
$$\nu = 1, 2, 3 \dots n$$

Die Division durch P ergibt die prozentuale Zusammensetzung des Preises

$$1 = \frac{G}{P} + \frac{K_1}{P} + \frac{K_2}{P} + \dots + \frac{K_\nu}{P} + \dots + \frac{K_n}{P}$$
$$= p_G + p_1 + p_2 + \dots + p_\nu + \dots + p_n$$
$$= p_G + \sum_{\nu=1}^n p_\nu$$

Es sei P_0 der Ausgangspreis

$$P_0 = G_0 + \sum_{\nu=1}^n K_{\nu,0}$$

P sei der Preis der sich nach einer beliebigen Änderung der einzelnen Terme ergibt

$$P = G + \sum_{\nu=1}^n K_\nu$$

Sind die einzelnen Änderungen bekannt, dann ergibt sich der Preis aus dem Ausgangspreis P_0 wie folgt:

$$P = G_0 \frac{G}{G_0} + \sum_{\nu=1}^n K_{\nu,0} \frac{K_\nu}{K_{\nu,0}}$$

$$\begin{aligned} &= P_0 \left(\frac{G_0}{P_0} \cdot \frac{G}{G_0} + \sum_{\nu=1}^n \frac{K_{\nu,0}}{P_0} \frac{K_{\nu}}{K_{\nu,0}} \right) \\ &= P_0 \left(p_{G,0} \frac{G}{G_0} + \sum_{\nu=1}^n p_{\nu,0} \frac{K_{\nu}}{K_{\nu,0}} \right) \end{aligned}$$

2.6.1

=====

Wobei die Ausgangsdaten durch den Index Null gekennzeichnet sind.
Sieht man von einer Änderung des Gewinnanteils G ab, so ändert sich der Ausgangspreis P_0 bei der Änderung nur eines Terms um das p -fache

$$p = p_{\nu,0} \left(\frac{K_{\nu}}{K_{\nu,0}} - 1 \right)$$

Bei Änderung mehrerer Terme, einschließlich des Gewinnanteils, läßt sich allgemein schreiben

$$p = p_{G,0} \left(\frac{G}{G_0} - 1 \right) + \sum_{\nu=1}^m p_{\nu,0} \left(\frac{K_{\nu}}{K_{\nu,0}} - 1 \right) \quad 2.6.2$$

=====

wobei

$$\nu = 1, 2, 3 \dots m \quad \text{und}$$

$$m \leq n$$

Damit ergibt sich

$$\underline{\underline{P = (1 + p) P_0}}$$

2.6.3

3. Ergebnisse der Analyse

Zum besseren Verständnis des Folgenden werden einige Bemerkungen über den Unterschied zwischen Preisen und Kosten sowie über die Vergleichbarkeit und die Beurteilung von Preisen erforderlich.

Für den Preis eines Gegenstandes soll folgende Definition gelten:

Der Preis eines Gegenstandes ist die Summe aus den dem Hersteller durch die Herstellung erwachsenden Kosten, einem Risikozuschlag und einem angemessenen Gewinn.

Als Kosten sollen die zur Erstellung eines Gegenstandes oder der Erbringung einer Leistung effektiv **aufzuwendenden Kapitalmittel** verstanden werden.

Die Bezeichnung Preis oder Kosten ist demnach eine Standpunktfrage. Für die Firma, die ein Kraftwerk liefert bzw. baut sind die Preise ihrer Unterlieferanten Kosten; andererseits sind die Preise der Lieferfirma für den Betreiber des Kraftwerkes Kosten.

Als Anlagekosten sollen im folgenden allgemein die Kosten des Betreibers, d. h. die Preise des Anlagenlieferanten bezeichnet werden.

Für die Vergleichbarkeit von Anlagepreisen (-kosten) ist beim heutigen Stand der Entwicklung und Bauerfahrung der Zeitunterschied zwischen zwei Kostenangaben für die gleiche Anlage bzw. für technisch vergleichbare Anlagen zu berücksichtigen. So wird zum Beispiel heute eine Anlage zu einem Preis angeboten, der 75% des Preises beträgt, zu dem die **Anlage gleicher Leistung vor ca 2...3 Jahren** verkauft wurde. An dieser Preissenkung ist das kleiner gewordene Kalkulations- und Garantierisiko der planenden Firma durch größere Bauerfahrung und der verringerte Anteil der Entwicklungskosten ebenso beteiligt, wie die Verbilligungen durch Verbesserungen. In welchem Maße diese Verbilligung durch Verbesserungen oder durch den Abbau der "Risikozuschläge"

- im Sinne der oben getroffenen Definition des Preises - verursacht wurde, läßt sich nicht angeben.

Zur Kategorie der Risikozuschläge gehört auch der Unterschied zwischen Fest- und Gleitpreisen. Nach Firmenangaben beträgt er etwa 6...8% des Gleitpreises, d. h. der Gleitpreis kann bei gleicher Bauzeit zum Zeitpunkt des Kaufabschlusses um 6...8% unter einem entsprechenden Festpreis, der künftige Preiserhöhungen berücksichtigt, liegen.

Neben diesen Faktoren werden die Angebotspreise sowohl durch allgemeine Preisbewegungen als auch durch die jeweilige Wettbewerbssituation und die Preispolitik der anbietenden Firma beeinflusst. Die hier wirksamen Faktoren entziehen sich größtenteils einer rationalen Betrachtung.

Weiter ist bei der Beurteilung von Preisangaben zu beachten, ob in diesen Preisen Vorleistungen für andere Bauvorhaben am gleichen Standort enthalten sind, bzw. ob dem Preis Vorleistungen zugute kommen, die schon bei der Erstellung eines früheren Projektes erbracht wurden, und ob Standortunterschiede die Preise wesentlich beeinflussen.

Dieser komplexe Aufbau des Anlagenpreises bringt es mit sich, daß die einzelnen Einflüsse selbst bei vergleichbaren Anlagen für den Außenstehenden nicht zu trennen sind.

3.1. Ermittlung globaler Abschätzungsformeln für die Gesamtanlagekosten in Abhängigkeit von der Kraftwerksleistung

Die Genauigkeit solcher Abschätzungsformeln hängt wesentlich von der Zahl der zu ihrer Herleitung zur Verfügung stehenden vergleichbaren Kostendaten ab. Im Leistungsbereich $N > 250 \text{ MW}_e$ stehen uns jedoch nur wenige vergleichbare Kostendaten für Kernkraftwerke zur Verfügung. An Anlagekosten, die für europäische Kernkraftwerke dieser Größenordnung repräsentativ sind, mangelt es z. Z. noch fast gänzlich.

Für den amerikanischen Raum veröffentlichte General Electric kürzlich eine lückenlose Preisliste für Siedewasserreaktoren im Bereich von $50 \text{ MW}_e \leq N_{\text{netto}} \leq 1000 \text{ MW}_e$. Nachfragen bei der deutschen Industrie, in wie weit diese Preise für europäische Verhältnisse Gültigkeit hätten, ergaben folgendes Bild:

Die G E - Preise sind durchaus auf europäische Verhältnisse anzuwenden, wenn man - bei Umrechnung mit dem amtlichen Wechselkurs $1\$ = 4 \text{ DM}$ - den geringeren Lieferumfang des G E - Angebotes berücksichtigt. Nach Untersuchungen von K. D. FISCHER *) lassen sich jedoch Umrechnungsfaktoren < 4 annehmen, und zwar basieren diese Umrechnungsfaktoren auf Vergleichskalkulationen einer nicht genannten deutschen Firma.

FISCHER vergleicht in seiner Untersuchung für eine bestimmte Anlage die Anlagekosten verschiedener Bauteile nach amerikanischer Kalkulation bei Umrechnung über die Wechselkursparität mit besagter deutscher Vergleichskalkulation und führt für diese Bauteile Umrechnungsfaktoren zwischen 0,5 und 1,0 ein. Er kommt dann zu dem Ergebnis, daß bei der Projektierung eines bestimmten Reaktors unter deutschen Preisverhältnissen nur 71% der Investitionssumme erreicht wird, die sich bei der Umrechnung amerikanischer Kostenangaben nach der Wechselparität ergeben würde.

*) K. D. FISCHER: Struktur und Beeinflussungsfaktoren der Stromerzeugungskosten in Kernkraftwerken

Zu diesem Ergebnis ist zu sagen, daß es etwas zu optimistisch zu Gunsten der deutschen Verhältnisse ausgefallen ist. Anscheinend lag zwischen beiden Kalkulationen ein zu großer Zeitunterschied, so daß sie zum Zeitpunkt des Vergleiches als nicht vergleichbar gelten konnten. (Siehe auch Bemerkungen zur Vergleichbarkeit von Preisen, Seite 39)

Bei Druckwasserreaktoren ist die Lage hinsichtlich der Kostendaten wesentlich schlechter. Die Abschätzungsformeln können sich hier nur auf einige Angaben aus der Industrie stützen.

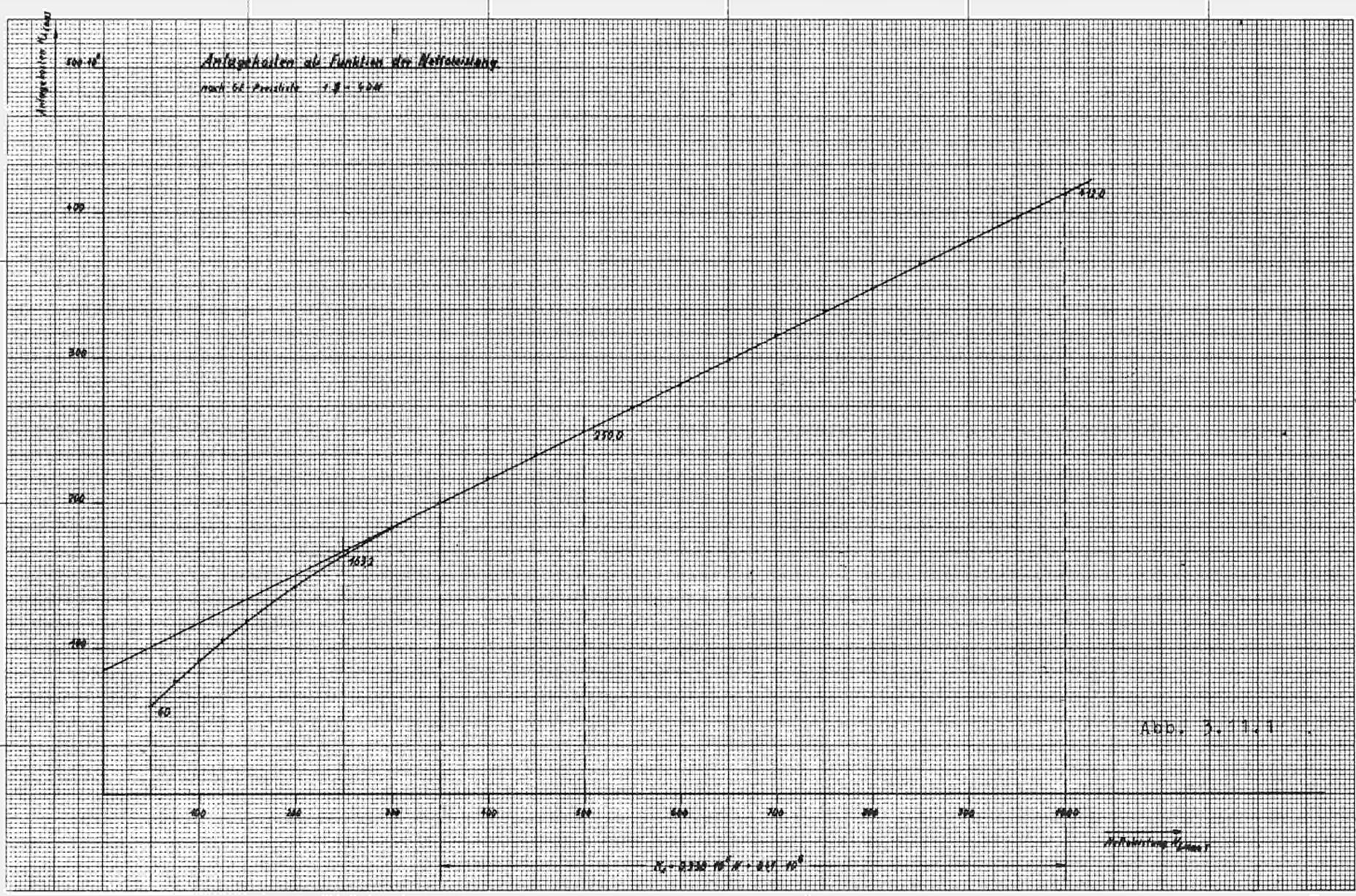
3.1.1. Abschätzungsformeln für Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktoren

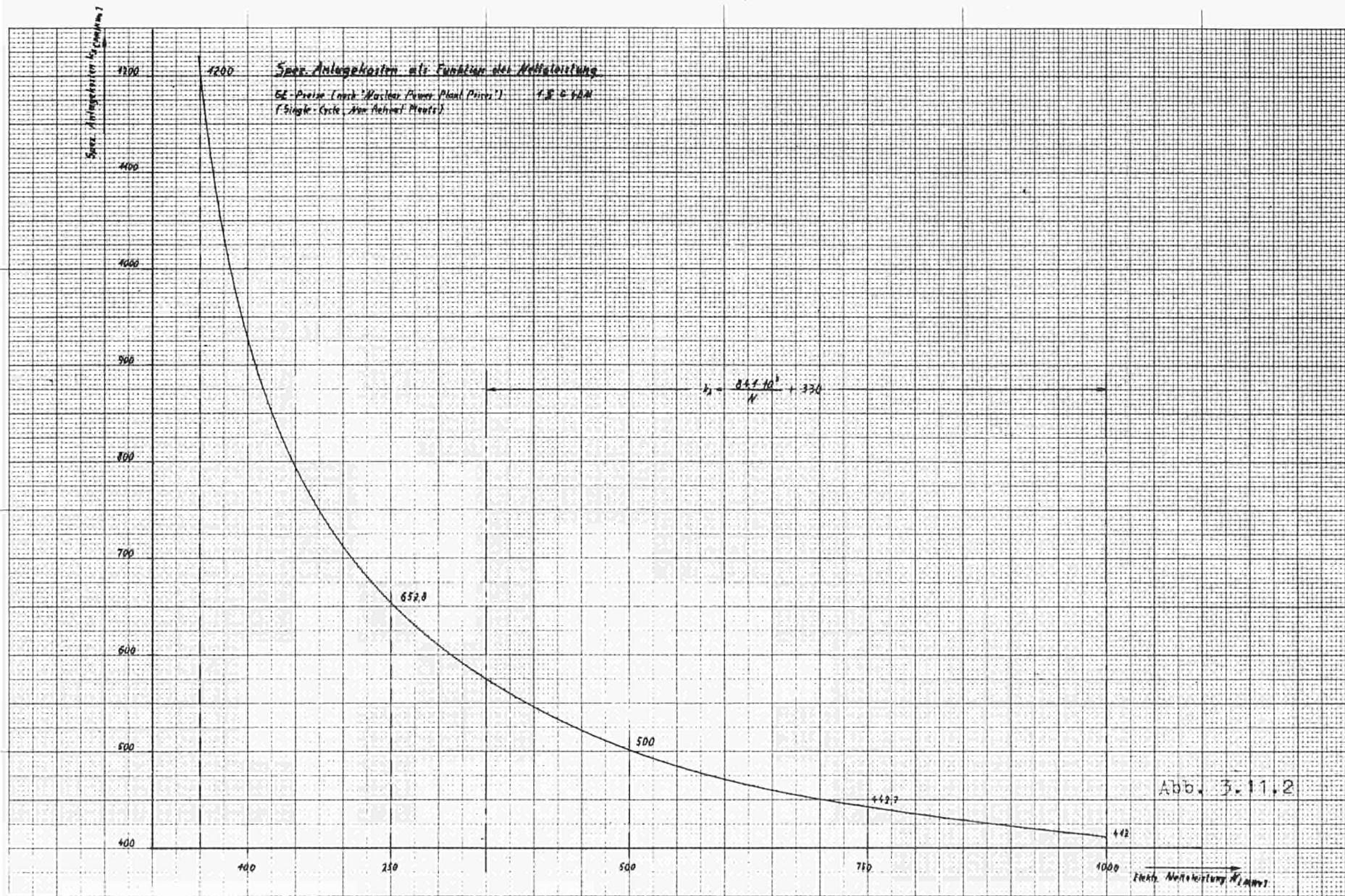
Nimmt man an, daß die G E - Preise in der Tendenz richtig liegen, in der absoluten Höhe jedoch für europäische Verhältnisse nicht ganz zutreffen, dann läßt sich eine genaue Analyse der G E - Preise und eine Anwendung der Ergebnisse dieser Analyse auf die Anlagekosten von Siedewasserreaktor-Kernkraftwerken europäischer Herstellung vertreten, wobei davon auszugehen ist, daß die von der G E veröffentlichten Anlagekostenkurve eine Grenzkostenkurve im Sinne des Abschn. 2.5 Abb. 2.5.1 darstellt Berücksichtigt man weiter, daß die Aussagen von K.D. FISCHER ¹⁾ zu optimistisch, die der Industrie zu pessimistisch sind und nimmt an, daß die Preise der G E - Preisliste für europäische Verhältnisse etwa 10% zu hoch liegen, der Lieferumfang jedoch um 7 ... 8% des angegebenen Preises geringer ist, dann läßt sich auch die Preishöhe, zumindest als Mittelwert, für europäische Verhältnisse bei entsprechend größerem Lieferumfang beibehalten. (Zu den Anlageteilen, die - im Gegensatz zu deutschen Angeboten - im G E - Preis nicht enthalten sind, zählen beispielsweise die Maschinentransformatoren, die Harzfüllung der Mischbettfilter, die Ölerstausstattung der Turbinenschmieranlage usw.)

In Abb. 3.11.1 sind die Preise für Einkreisanlagen wie sie die G E in ihrer Preisliste vom Herbst 1964 veröffentlicht hat im linearen Netz dargestellt. Die Darstellung zeigt deutlich im Bereich

$$50 \text{ MWe} \leq N_{\text{netto}} \leq 350 \text{ MWe}$$

1) siehe Fußnote 1) Seite 41





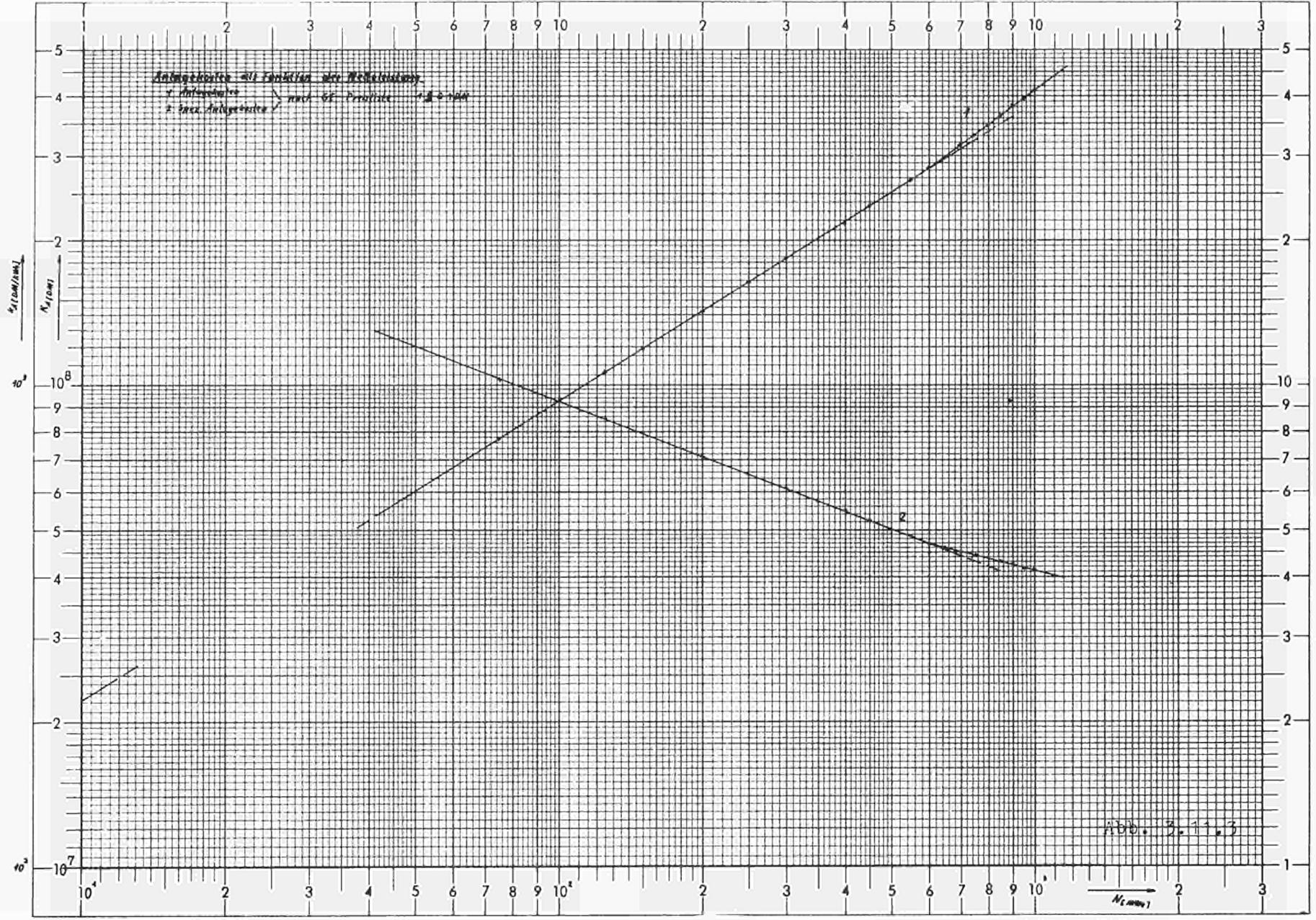


Abb. 3.11.3

einen **degressiven Kostenverlauf**, an den sich der **proportionale Teil anschließt**.

Die Abb. 3.11.3 (Kurve 1) zeigt die gleichen Daten in logarithmischer Darstellung. Sie setzt sich näherungsweise aus zwei Geradenstücken zusammen, deren Schnittpunkt bei etwa 600 MWe liegt.

Die Approximation im logarithmischen Netz mit Hilfe der Fehlerquadratmethode liefert für die Geradengleichung

$$y = m x + C \quad 3.11.1$$

$$\log K_A = m \log N + \log C \quad 3.11.2$$

im Bereich $50 \text{ MWe} \leq N \leq 600 \text{ MWe}$

(Siehe Tabelle auf Seite 47)

Aus dem Gleichungssystem 2.431.7 Seite 26 ergibt sich dann:

$$\Delta = n \cdot \sum_{v=1}^n x_v^2 - \left(\sum_{v=1}^n x_v \right)^2 = 21,5107 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta_m = n \cdot \sum_{v=1}^n x_v \cdot y_v - \sum_{v=1}^n x_v \cdot \sum_{v=1}^n y_v = 13,3355 \cdot 10^{-2}$$

$$\Delta_c = \sum_{v=1}^n x_v^2 \cdot \sum_{v=1}^n y_v - \sum_{v=1}^n x_v \cdot \sum_{v=1}^n x_v \cdot y_v = 144,6624 \cdot 10^{-2}$$

und daraus nach Gleichung 2.431.8 und 2.431.9

$$\underline{\underline{m}} = \frac{\Delta_m}{\Delta} = 0,6199 \approx \underline{\underline{0,62}} \quad 3.11 .3$$

und

$$C = \frac{\Delta_c}{\Delta} = 6.7251 = \lg c$$

$$\underline{\underline{c}} = 5,31 \cdot 10^6$$

Aus Gleichung 3.11 .2 erhält man damit:

ν	$\frac{N_\nu}{[\text{Mwe}]}$	$x_\nu = \lg \frac{N_\nu}{[\text{Mwe}]}$	x_ν^2	$\frac{K_\nu}{[\text{DM}]}$	$y_\nu = \log \frac{K_\nu}{[\text{DM}]}$	$x_\nu \cdot y_\nu$
1	50	1,69897	2,88650	60,0 · 10 ⁶	7,77815	13,21484
2	75	1,87506	3,51585	77,2 "	7,88762	14,78976
3	100	2,00000	4,00000	92,4 "	7,96567	15,93134
4	125	2,09691	4,39703	106,0 "	8,02531	16,82835
5	150	2,17609	4,73537	118,8 "	8,07482	17,57153
6	200	2,30103	5,29474	141,6 "	8,15106	18,75583
7	250	2,39794	5,75012	163,2 "	8,21272	19,69361
8	300	2,47712	6,13612	182,4 "	8,26102	20,46354
9	350	2,54407	6,47229	200,0 "	8,30103	21,11840
10	400	2,60206	6,77072	217,6 "	8,33766	21,69509
11	450	2,65321	7,03952	234,0 "	8,36922	22,20530
12	500	2,69897	7,28444	250,0 "	8,39794	22,66579
13	550	2,74036	7,50957	266,0 "	8,42488	23,08720
14	600	2,77815	7,71812	280,8 "	8,44840	23,47092
$\sum_{\nu=1}^{14}$		33,03994	79,51038		114,63550	271,49151

$$\frac{K_A}{[DM]} = 5,31 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{N}{[MWe]} \right)^{0,62} \quad 3.11.4$$

=====

und die spez. Anlagekosten nach Gleich. 2.51.4

$$\frac{k_A}{[DM/KWe]} = 5,31 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{[MWe]}{N} \right)^{0,38} \quad 3.11.5$$

=====

Im Bereich $600 \text{ MWe} \leq N \leq 1000 \text{ MWe}$
lassen sich die Gesamtanlagekosten wie folgt approximieren:

(Siehe Tabelle Seite 49)

$$\begin{aligned} \Delta &= 41,2672 \cdot 10^{-2} \\ \Delta_m &= 31,0005 \cdot 10^{-2} \\ \Delta_c &= 262,5127 \cdot 10^{-2} \\ m &= \frac{\Delta_m}{\Delta} = 0,75121 \approx 0,75 \quad 3.11.6 \\ c &= \frac{\Delta_c}{\Delta} = 6.36129 = \lg c \\ c &= 2,2977 \cdot 10^6 \approx 2,3 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

=====

Damit erhält man als Näherungsgleichung für den Bereich

$$500 \text{ MWe} \leq N \leq 1000 \text{ MWe}$$

$$\frac{K_A}{[DM]} = 2,3 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{N}{[MWe]} \right)^{0,75} \quad 3.11.7$$

=====

und für die spez. Anlagekosten

v	$\frac{N_v}{[MWe]}$	$x_v = \log \frac{N_v}{[MWe]}$	x_v^2	$\frac{K_v}{[DM]}$	$y_v = \log \frac{K_v}{[DM]}$	$x_v \cdot y_v$
1	600	2,77815	7,71812	$280,8 \cdot 10^6$	8,44840	23,47092
2	650	2,81291	7,91246	298,0 "	8,47422	23,83722
3	700	2,84510	8,09459	315,2 "	8,49859	24,17933
4	750	2,87506	8,26597	332,0 "	8,52114	24,49879
5	800	2,90309	8,42793	348,4 "	8,54208	24,79843
6	850	2,92942	8,58150	364,8 "	8,56205	25,08184
7	900	2,95424	8,72753	380,8 "	8,58070	25,34945
8	950	2,97772	8,86682	396,4 "	8,59813	25,60282
9	1000	3,00000	9,00000	412,0 "	8,61490	25,84470
		26,07569	75,59492		76,84021	222,65350

$$\frac{K_A}{[DM/KWe]} = 2,3 \cdot 10^3 \left(\frac{[MWe]}{N} \right)^{0,25} \quad 3.11.8$$

=====

Für die praktische Berechnung interessanter als die oben ermittelten Kostenbeziehungen, sind die auf eine Vergleichsanlage bezogenen relativen Kosten. (Siehe Gleichung 2.42.10 und 2.42.11)

Für die mittleren Anlagekosten von Siedewasserreaktor-Kernkraftwerken gelten unter der Voraussetzung, daß die G E -Preise im Verlauf richtig sind, folgende Beziehungen:

Im Bereich

$$50 \text{ MWe} \leq N \leq 600 \text{ MWe}$$

$$\frac{K_A}{K_{A,o}} = \left(\frac{N}{N_o} \right)^{0,62} \quad 3.11.9$$

=====

$$\frac{k_A}{k_{A,o}} = \left(\frac{N_o}{N} \right)^{0,38} \quad 3.11.10$$

=====

und im Bereich

$$600 \text{ MWe} \leq N \leq 1000 \text{ MWe}$$

$$\frac{K_A}{K_{A,o}} = \left(\frac{N}{N_o} \right)^{0,75} \quad 3.11.11$$

=====

$$\frac{k_A}{k_{A,o}} = \left(\frac{N_o}{N} \right)^{0,25} \quad 3.11.12$$

=====

Dabei sind die Daten einer Vergleichsanlage $K_{A,o}$ bzw. $k_{A,o}$ und N_o aus dem Geltungsbereich der verwendeten Gleichung zu

nehmen.

Für beide Geltungsbereiche können die Daten einer vergleichbaren 600 MWe - Anlage verwendet werden.

Für europäische Verhältnisse stellen die Gleichungen 3.11.9...12 eine mittlere Kostenkurve im Sinne der Kurve 2 der Abb. 2.5.1 dar, wobei für die 600 MWe - Anlage ein mittlerer Preis von

$$K_{A,600} = 286 \cdot 10^6 \text{ DM} \text{ bzw. } k_A \approx 477 \frac{\text{DM}}{\text{kWe}}$$

angenommen werden kann.

Die obere und untere Grenzkurve der Anlagekosten wird in Abschnitt 3.2.1 abgeschätzt.

3.1.2. Abschätzungsformeln für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren

Zur Ermittlung von Abschätzungsformeln für die Gesamtanlagekosten von Druckwasserreaktoren standen 5 Kostenangaben zur Verfügung. Die Auswertung dieser Daten erfolgt im Abschnitt 3.2.2 und ist dort näher erklärt. An dieser Stelle sollen deshalb nur die Ergebnisse der Auswertung gebracht werden. (Siehe Gleichung 3.22.6 und 3.22.7)

Im Bereich

$$50 \text{ MWe} \leq N \leq 600 \text{ MWe}$$

gilt folgende relative Kostenbeziehung für die mittleren Anlagekosten

$$\frac{K_A}{K_{A,o}} = \left(\frac{N}{N_o} \right)^{0,59} \quad 3.12.1$$

=====

bzw. für die spezifischen mittleren Anlagekosten

$$\frac{k_A}{k_{A,o}} = \left(\frac{N_o}{N} \right)^{0,41} \quad 3.12.2$$

=====

und im Bereich

$$600 \text{ MWe} \leq N \leq 1000 \text{ MWe}$$

$$\frac{K_A}{K_{A,o}} = \left(\frac{N}{N_o} \right)^{0,71} \quad 3.12.3$$

=====

und

$$\frac{k_A}{k_{1,o}} = \left(\frac{N_o}{N} \right)^{0,29} \quad 3.12.4$$

=====

bei einem mittleren Preis für die 600 MWe-Vergleichsanlage
von:

$$K_{A,600} = 287 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{bzw.}$$

$$k_{A,o} \approx 478 \frac{\text{DM}}{\text{kWe}}$$

3.2. Globalschätzungsformeln für die Anlagekosten von Systemen und Integration der Kosten zu den Gesamtanlagekosten

In diesem Kapitel sollen die Gesamtanlagekosten etwas differenzierter dargestellt werden und zwar in Form der Gleichung 2.52.4

Zu diesem Zweck wird die Anlage in folgende 3 Systeme aufgeteilt:

- a) nukleares Dampferzeugersystem
- b) konventioneller Kraftwerksteil
- c) Restteil

Die beiden ersten Systeme (a) und b)) umfassen die in den Gliederungen in Abschnitt 2.2.3 bzw. 2.2.4 angegebenen Komponenten. Im Restteil sind die nuklearen und konventionellen Nebenanlagen, sowie der gesamte Bauteil enthalten.

Diese Unterteilung wurde aus folgenden Gründen in dieser Form getroffen:

Verdoppelt man die Anzahl der Reaktoren je Kraftwerksblock indem man anstelle eines Reaktors 2 Reaktoren der halben Nennleistung installiert, dann verdoppelt sich auch die Zahl der Komponenten des nuklearen Dampferzeugungssystems. Die nuklearen Nebenanlagen werden sich jedoch relativ unabhängig von der Zahl der Reaktoren nur mit der Gesamt-Nennleistung ändern.

Das gleiche gilt auch für den konventionellen Kraftwerksteil, auch hier wird sich die Zahl der Komponenten entsprechend der Zahl der Turbinen ändern, während die konventionellen Nebenanlagen sich entsprechend der Gesamtnennleistung ändern.

Der Bauteil ist in diesem Modell nicht so eindeutig unterzubringen. Bei Verdoppelung der Zahl der Turbinen z.B. wird man zwar keine zwei Maschinenhäuser bauen, das benötigte Maschinenhaus wird jedoch größer und damit teurer werden müssen als

ein Maschinenhaus für eine Turbine der gleichen Gesamtleistung. Da die Kosten des gesamten Bauteils einer 600 MW_e - Anlage nur 18...20% der direkten Anlagekosten betragen und mit zunehmender Leistung abnehmen, kann der durch die Verdoppelung der Turbinenzahl für $N > 600 \text{ MW}_e$ verursachte Sprung in den Kosten des Maschinenhauses innerhalb dieses Modells vernachlässigt werden.

In den folgenden Ausführungen werden die erforderlichen Daten teilweise aus Kostenangaben für 600 MW_e - Anlagen ermittelt, da Projekte dieser Einheitsleistung z. Z. in der Industrie untersucht werden bzw. Angebote für Kraftwerke dieser Leistung gemacht worden sind. Die Entwicklung im Kraftwerksbau in Europa scheint sich demnach in Richtung auf Einheitsgrößen von 300; 600 und 1200 MW_e zu bewegen.

Bei der Bestimmung der Kostenfunktionen der einzelnen Systeme wird wie folgt vorgegangen:

Zunächst wird eine geeignete mittlere Kostenkurve für die direkten Anlagekosten festgelegt. Dieser Kostenkurve werden dann die aus der unstetigen Änderung einzelner Systeme resultierenden Sprünge überlagert, woraus sich die endgültige Form der Kostenkurve ergibt.

Für den konventionellen Kraftwerksteil wird angenommen, daß der Degressionsexponent hauptsächlich von der Turbinenanlage bestimmt wird. Diese Annahme ist insofern berechtigt, als die Kosten der Turbinenanlage ca. 50...55% der Kosten des konventionellen Kraftwerksteiles ausmachen. Als Exponent wurde anhand der Detailuntersuchung der Turbinenanlage (siehe Abschnitt 3.3.2.1) der Wert

$$m_3 = 0,7$$

für den Bereich $50 \text{ MW}_e \leq N_T \leq 600 \text{ MW}_e$

gewählt. (N_T = Nettoleistung des Turbogeneratorsatzes)

Weiter wird die Annahme getroffen, daß die augenblickliche

Grenzleistung der Turbinen bei ca. 600 MWe liegt. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, daß oberhalb dieser Grenze zwei Turbinen installiert werden müssen, und zwar werden diese Turbinen aus Wirtschaftlichkeitsgründen jeweils die halbe Kraftwerksnennleistung besitzen. In der Kostenkurve wird daher bei der Grenzleistung $N = 600$ MWe ein Sprung auftreten, dessen Größe durch die Differenz zwischen den Kosten eines konventionellen Kraftwerksteils von 600 MWe und zwei Anlagen von 300 MWe bestimmt ist.

Für den Kostenverlauf des nuklearen Dampferzeugungssystems werden die Degressionsexponenten aus Angaben der konsultierten Firmen berechnet. Außerdem wird angenommen, daß bis zur oberen Grenze des Untersuchungsbereiches (1000 ... 1200 MWe) nur eine Reaktoranlage je Kraftwerksblock verwendet wird, da technisch keine Notwendigkeit zur Aufteilung der Leistung auf zwei Reaktoren besteht.

Über den Kostenverlauf des Restteils lassen sich keine genauen Angaben machen. Für den Bauteil, der den größten Anteil des Restes stellt, läßt sich nach TID - 7025 ¹⁾ im Prinzip folgender Kostenverlauf in Abhängigkeit von der Kraftwerksnettoleistung annehmen (Abb. 3.2.1)

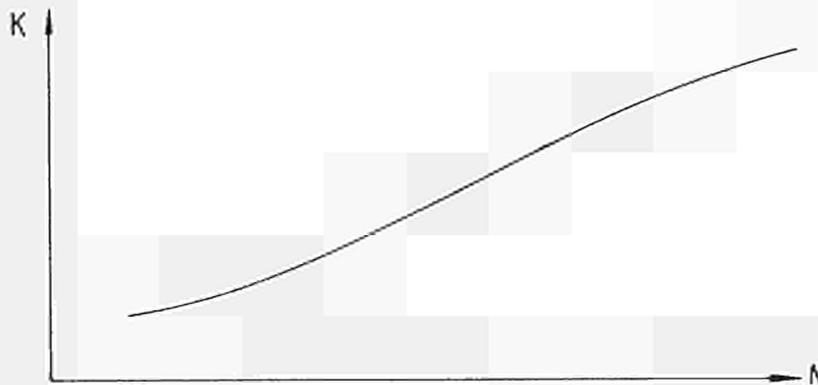


Abb. 3.2.1

d.h. die Kosten ändern sich bei sehr kleinen Leistungen ($N < 50$ MWe) überproportional, im mittleren Bereich ($N \approx 200 \dots 300$ MWe) proportional und im oberen Bereich un-

1) KAISER ENGINEERS; Division of HenryJ. Kaiser Company; Oakland, Cal.: "Guide to Nuclear Power Cost Evaluation"; Volume 2.

terproportional. Dieser Verlauf läßt sich dadurch erklären, daß bei kleinen Leistungen ein gewisser Bauaufwand nicht unterschritten werden kann und bei großen Leistungen ein Teil der Baukosten unabhängig von der Leistung konstant bleibt bzw. nur geringfügig zunimmt.

Eine ähnliche Tendenz werden die im Restglied zusammengefaßten Nebenanlagen aufweisen. Die Speisewasseraufbereitungsanlage, die Abgasanlage, die Werkstatt und ähnliche Einrichtungen werden bei einem 1000 MWe - Kraftwerk beispielsweise nicht wesentlich größer sein als bei einem 600 MWe-Kraftwerk.

Vernachlässigt man den Bereich $N < 50$, dann ergibt sich in der doppelt-logarithmischen Darstellung folgendes Kostenbild,

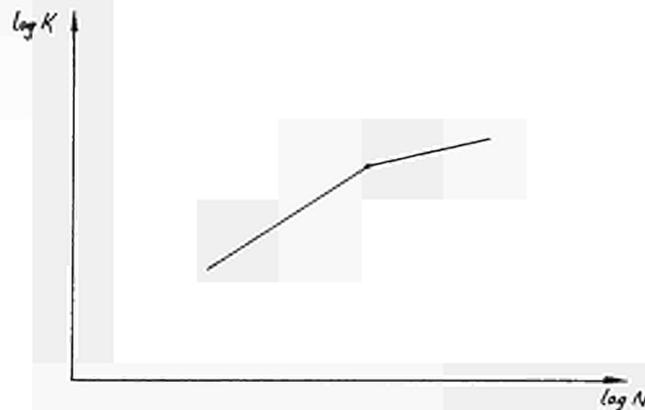


Abb. 3.2.2

d.h. im Gegensatz zu den anderen Kostenkurven wird der Exponent der Näherungskurven mit wachsender Leistung kleiner.

Da für den Restteil **in dieser Form keine Angaben vorliegen**, aus denen der Verlauf der Kurve ermittelt werden kann, soll zur Bestimmung des Kurvenverlaufs folgende Methode angewandt werden. (Eine genauere Untersuchung erfolgt in Abschnitt 3.3)

Für ihre Gültigkeit muß vorausgesetzt werden, daß die vorher festgelegte mittlere Kostenkurve für Anlagen gültig ist, die im untersuchten Bereich (50 ... 1200 MWe) nur einen Reaktor je Anlage, bis zur Grenzleistung $N = 600$ MWe einen Turbogenera-

torsatz und bei Leistungen $N > 600$ MWe zwei Turbogenerator-sätze der halben Kraftwerksnennleistung enthalten. Außerdem muß der Kostenverlauf für die beiden anderen Systeme in der Tendenz richtig wiedergegeben sein.

Sind diese Voraussetzungen erfüllt, wird wie folgt vorgegangen. Der mittleren Gesamt-Kostenkurve (in Abb. 3.2.3 in logarithmischer Darstellung) wird bei der Leistung $N = 600$ MWe ein Sprung von der Größe symmetrisch überlagert, die sich aus der

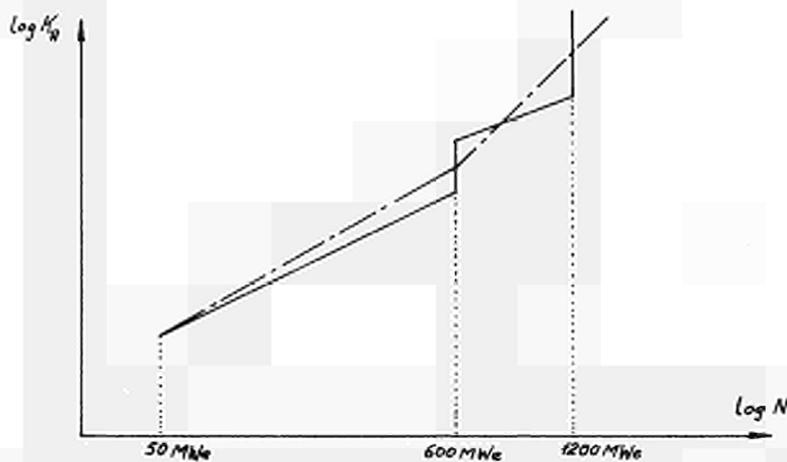


Abb. 3.2.3

Differenz zwischen den Kosten eines konventionellen 600 MWe-Teils und zweier 300 MWe-Kraftwerksteile ergibt. Die nächste Unstetigkeit würde beim Übergang auf eine Kraftwerksleistung $N > 1200$ MWe entstehen. Hier kann ein Übergang von zwei 600 MWe- auf vier 300 MWe-Turbosätze als Grenzbedingung angenommen werden, wenn man für die Turbinenanlagen Einheitsgrößen von 300 MWe bzw. 600 MWe voraussetzt. (Wirtschaftlich günstiger wäre hier ein Übergang auf eine Anlage mit 3×400 MWe-Turbosätzen). Der Sprung in den Anlagekosten wird also doppelt so groß wie der bei $N = 600$ MWe sein. Der Verlauf der Kostenkurve zwischen diesen Unstetigkeitsstellen wird folgendermaßen angenommen:

Eine kleine Leistung - in diesem Fall 50 MWe - wird als Ausgangswert gewählt; an dieser Stelle sollen die tatsächlichen Kosten gleich den mittleren Kosten sein. Die Kostenkurve verläuft zwischen diesem Punkt und der unteren Grenze des Sprunges bei 600 MWe im logarithmischen Netz geradlinig - d.h. mit kon-

stantem Exponenten. Zwischen der oberen Grenze des Sprunges bei 600 MWe und der unteren des Sprunges bei 1200 MWe wird ebenfalls ein geradliniger Verlauf im logarithmischen Kostendiagramm angenommen (siehe Abb. 3.2.3).

Trägt man diesen Verlauf der tatsächlichen Kostenkurve in ein lineares Netz ein (siehe z.B. Abb. 3.21.3) und subtrahiert die Kostenanteile des nuklearen Dampferzeugungssystems und des konventionellen Kraftwerksteils, dann bleibt der Anteil des Restes am Gesamtpreis übrig. Die Exponenten des Kostenverlaufes des Restgliedes lassen sich daraus ermitteln.

Die Kostenfunktionen der einzelnen Systeme lassen sich dann zu einer Beziehung (Gleich. 2.52.4) zusammensetzen, die zumindest näherungsweise allgemein - d.h. auch für andere Konfigurationen, z.B. 2 Reaktoren und 3 Turbinen unterschiedlicher Nennleistung usw. - gilt.

3.2.1 Abschätzungsformeln für Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktoren

Für ein 600 MWe - Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor betragen nach den bisherigen Ermittlungen die Anteile der Systeme an den gesamten direkten Anlagekosten:

nukleares Dampferzeugungssystem	33%
konventioneller Kraftwerksteil	33%
Restteil	34%

Als spez. Anlagekosten der 600 MWe - Anlage können

$$k_A = 460 \frac{\text{DM}}{\text{kWe}}$$

angenommen werden. Damit ergeben sich die Anlagekosten zu

$$K_A = N \cdot k_A = 276 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Nach der oben angegebenen prozentualen Aufteilung entfallen dann auf die einzelnen Systeme folgende Beträge:

nukleares Dampferzeugungssystem	91,08 · 10 ⁶ DM
konventioneller Kraftwerksteil	91,08 · 10 ⁶ DM
Restteil	93,84 · 10 ⁶ DM
Summe	276 · 10 ⁶ DM

Für den Kostenverlauf des konventionellen Kraftwerksteils war ein Exponent von $m_3 = 0,7$ ermittelt worden, damit ergeben sich die Anlagekosten des konventionellen Kraftwerksteils einer 300 MWe - Anlage zu

$$K_{k,K} = 91,08 \cdot 10^6 \left(\frac{300}{600}\right)^{0,7} = 56,06 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Der Sprung in der Kostenkurve beträgt bei Verwendung zweier 300 MWe - Turbosätze anstelle eines 600 MWe - Satzes

$$\begin{aligned} \Delta K_{600} &= 2 \cdot K_{k,K,300} - K_{k,K,600} \\ &= (2 \cdot 56,06 - 91,08) \cdot 10^6 = 21,04 \cdot 10^6 \text{ DM} \\ &===== \end{aligned}$$

Der Sprung, der durch den Übergang von 2x600MW - auf 4x300MW - Turbosätze bei $N = 1200 \text{ MW}_e$ verursacht wird, hat die Größe

$$\Delta K_{1200} = 2 \cdot \Delta K_{600} = 42,08 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

=====

Die mittlere Kostenkurve geht bei $N = 600 \text{ MWe}$ durch

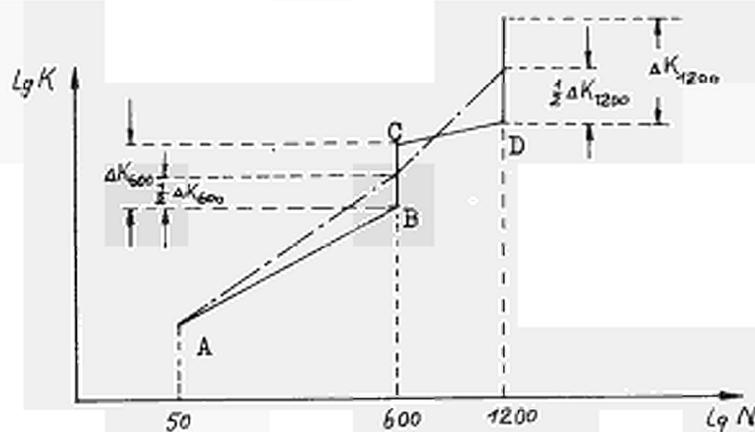


Abb. 3.21.1

den Punkt

$$K_{A,m,600} = 0,5 \Delta K_{600} + K_{A,600}$$

$$K_{A,m,600} = (10,52 + 276) \cdot 10^6 = 286,52 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

=====

Als Exponenten für den Verlauf der mittleren Kostenkurve können die im Abschnitt 3.1.1. Gleich. 3.11.3 und 3.11.6 berechneten Exponenten

$m = 0,62$	für $50 \text{ MWe} \leq N \leq 600 \text{ MWe}$
$m = 0,75$	für $600 \text{ MWe} \leq N \leq 1200 \text{ MWe}$

verwendet werden.

In der logarithmischen Darstellung der mittleren Kostenkurve (Abb. 3.21.2 Kurve 1) werden dann die Sprünge entsprechend der

Darstellung in der Skizze Abb. 3.21.1 eingetragen und der Kostenverlauf nach den Vereinbarungen in Abschnitt 3.2 durch geradlinige Verbindung der Endpunkte **AB** und **CD** angenähert.

Der Verlauf der Anlagekosten im linearen Netz ist in Abb. 3.21.3 (Kurve 2) zu sehen (obere vollausgezogene Sprungkurve).

Die Kostenkurve des konventionellen Kraftwerksteils ist in Abb. 3.21.2 (Kurve 3) eingetragen. Subtrahiert man diese Kosten im linearen Netz von den Gesamtanlagekosten, dann ergibt sich die Kurve 3 in Abb. 3.21.3. Diese Kurve stellt die Kostensumme **des nuklearen Dampferzeugers und des Restteils dar.**

Über den Verlauf der Kosten des nuklearen Dampferzeugungssystems sind bisher noch keine Aussagen gemacht worden. Da angenommen werden kann, daß die G.E. - Preisangaben ¹⁾ den Kostenverlauf richtig wiedergeben, sollen sie zur Bestimmung der Degressionsexponenten des nuklearen Dampferzeugungssystem Verwendung finden. Die aus diesen Angaben ermittelten Exponenten werden dann auf die vorliegenden Kostendaten der Vergleichsanlage angewendet.

Die Abb. 3.21.6 zeigt den Kostenverlauf des nuklearen Dampferzeugungssystems nach den Angaben der G.E. in linearer, die Abb. 3.21.7 den gleichen Verlauf in doppelt-logarithmischer Darstellung. Aus der letzteren ist zu entnehmen, daß auch hier die Kostenkurve durch zwei Geraden angenähert werden kann, deren Schnittpunkt bei $N = 600$ MWe liegt.

Die Approximation nach der Fehlerquadratmethode liefert für den Bereich

$$50 \text{ MWe} \leq N \leq 600 \text{ MWe}$$

(Siehe Tabelle Seite 62)

1) Atomic Power Equipment, Section I Page 4

(issued by General Electric)

Auszug in NUCLEONICS WEEK, Oktober 1, 1964

ν	$\frac{N_\nu}{[\text{MWe}]}$	$x_\nu = \lg \frac{N_\nu}{[\text{MWe}]}$	x_ν^2	$\frac{K_\nu}{[\text{DM}]}$	$y_\nu = \lg \frac{K_\nu}{[\text{DM}]}$	$x_\nu y_\nu$
1	50	1.69897	2,88650	$24,00 \cdot 10^6$	7,38021	12,53876
2	75	1.87506	3,51585	29,88	7,47538	14,01679
3	100	2.00000	4,00000	34,82	7,54258	15,08516
4	125	2.09691	4,39703	39,36	7,59506	15,92616
5	150	2.17609	4,73537	43,60	7,63949	16,62422
6	200	2.30103	5,29474	50,80	7,70586	17,73142
7	250	2.39794	5,75012	57,20	7,75740	18,60178
8	300	2.47712	6,13612	63,20	7,80072	19,32332
9	350	2.54407	6,47229	68,80	7,83759	19,93938
10	400	2.60206	6,77072	73,60	7,86688	20,47009
11	450	2.65321	7,03952	78,40	7,89432	20,94529
12	500	2.69897	7,28444	83,20	7,92012	21,37617
13	550	2.74036	7,50957	87,60	7,94250	21,76531
14	600	2.77815	7,71812	$92,00 \cdot 10^6$	7,96379	22,12460
	$\sum_{\nu=1}^{14}$	33.03994	79,51039		108,32190	256,46845

ν	$\frac{N_\nu}{[\text{MWe}]}$	$x_\nu = \lg \frac{N_\nu}{[\text{MWe}]}$	x_ν^2	$\frac{K_\nu}{[\text{DM}]}$	$y_\nu = \lg \frac{K_\nu}{[\text{DM}]}$	$x_\nu : y_\nu$
1	600	2,77815	7,71812	92 $\cdot 10^6$	7,96379	22,12460
2	650	2,81291	7,91246	96,4	7,98245	22,45391
3	700	2,84510	8,09459	101,2	8,00518	22,77554
4	750	2,87506	8,26597	105,6	8,02366	23,06850
5	800	2,90309	8,42793	110,0	8,04139	23,34488
6	850	2,92942	8,58150	114,4	8,05843	23,60653
7	900	2,95424	8,72753	119,2	8,07664	23,86033
8	950	2,97772	8,86682	123,2	8,09061	24,09157
9	1000	3,00000	9,00000	127,2 $\cdot 10^6$	8,10449	24,31347
$\sum_{\nu=1}^9$		26,07569	75,59492		72,34664	209,63933

$$K_{n,D} = 91,08 \cdot 10^6 \left(\frac{N}{600}\right)^{0,64}$$

Der Verlauf dieser Kurve in doppelt-logarithmischer Darstellung ist aus dem Diagramm Abb. 3.21.2 (Kurve 5) zu ersehen.

Die Subtraktion der Kosten des nuklearen Dampferzeugungssystem von der Kurve 3 in der Abb. 3.21.3 liefert die Kostenfunktion des Restteils (Kurve 4 in Abb. 3.21.3). Aus ihrer Darstellung im logarithmischen Netz (Abb. 3.21.2 Kurve 4) lassen sich die Degressionsexponenten bequem ermitteln.

Für den Bereich

$$50 \text{ MWe} \leq N \leq 600 \text{ MWe}$$

ist

$$m_1 = 0,62 \qquad \qquad \qquad 3.21.6$$

und für

$$600 \text{ MWe} \leq N \leq 1200 \text{ MWe}$$

ist

$$m_1 = 0,55 \qquad \qquad \qquad 3.21.7$$

berechnet worden.

Als allgemeine Darstellung der direkten Gesamtanlagekosten als Summe der Kosten der drei Systeme ergibt sich damit für Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktor

$$\frac{K_A}{K_{A,600}} = 0,34 \left(\frac{N}{600}\right)^{m_1} + 0,33Z_R \left(\frac{N_R}{600}\right)^{m_2} + 0,33Z_T \left(\frac{N_T}{600}\right)^{m_3}$$

Geltungsbereich: $50 \text{ MWe} \leq N \leq 1200 \text{ MWe}$ 3.21.8

mit:

N	m_1	m_2	m_3
<600 MWe	0,62	0,54	0,7
>600 MWe	0,55	0,64	0,7

- K_A = direkte Anlagekosten
 $K_{A,600}$ = direkte Anlagekosten einer Vergleichsanlage von $N_0 = 600$ MWe mit 1 Reaktor und 1 Turbo-Generator-Satz je Kraftwerksblock
 N = Kraftwerksnennleistung in MWe
 N_R = Reaktornennleistung in MWe
 N_T = Turbinenleistung in MWe
 Z_R = Zahl der Reaktoren gleicher Leistung je Kraftwerksblock
 Z_T = Zahl der Turbo-Generator-Sätze gleicher Leistung je Kraftwerksblock

Für deutsche Verhältnisse können z.Z. als Kostendaten der Vergleichsanlage angenommen werden:

$$k_{A,600} = 460 \text{ DM/kWe}$$

=====

$$K_{A,600} = 276 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

=====

Für die spez. Anlagekosten ergibt sich aus Gleichung 3.21.8 mit

$$N = Z_R N_R = Z_T \cdot N_T$$

$\frac{k_A}{k_{A,600}} = 0,34 \left(\frac{600}{N}\right)^{-m_1} + 0,33 \left(\frac{600}{N_R}\right)^{-m_2} + 0,33 \left(\frac{600}{N_T}\right)^{-m_3}$
--

3.21.9

Geltungsbereich: $50 \text{ MWe} \leq N \leq 1200 \text{ MWe}$

N	1-m ₁	1-m ₂	1-m ₃
<600 MWe	0,38	0,46	0,3
>600 MWe	0,45	0,36	0,3

Aus der graphischen Darstellung der spez. Anlagekosten in Abb. 3.21.5 ist zu entnehmen, daß die spez. Anlagekosten erst bei einer Leistung

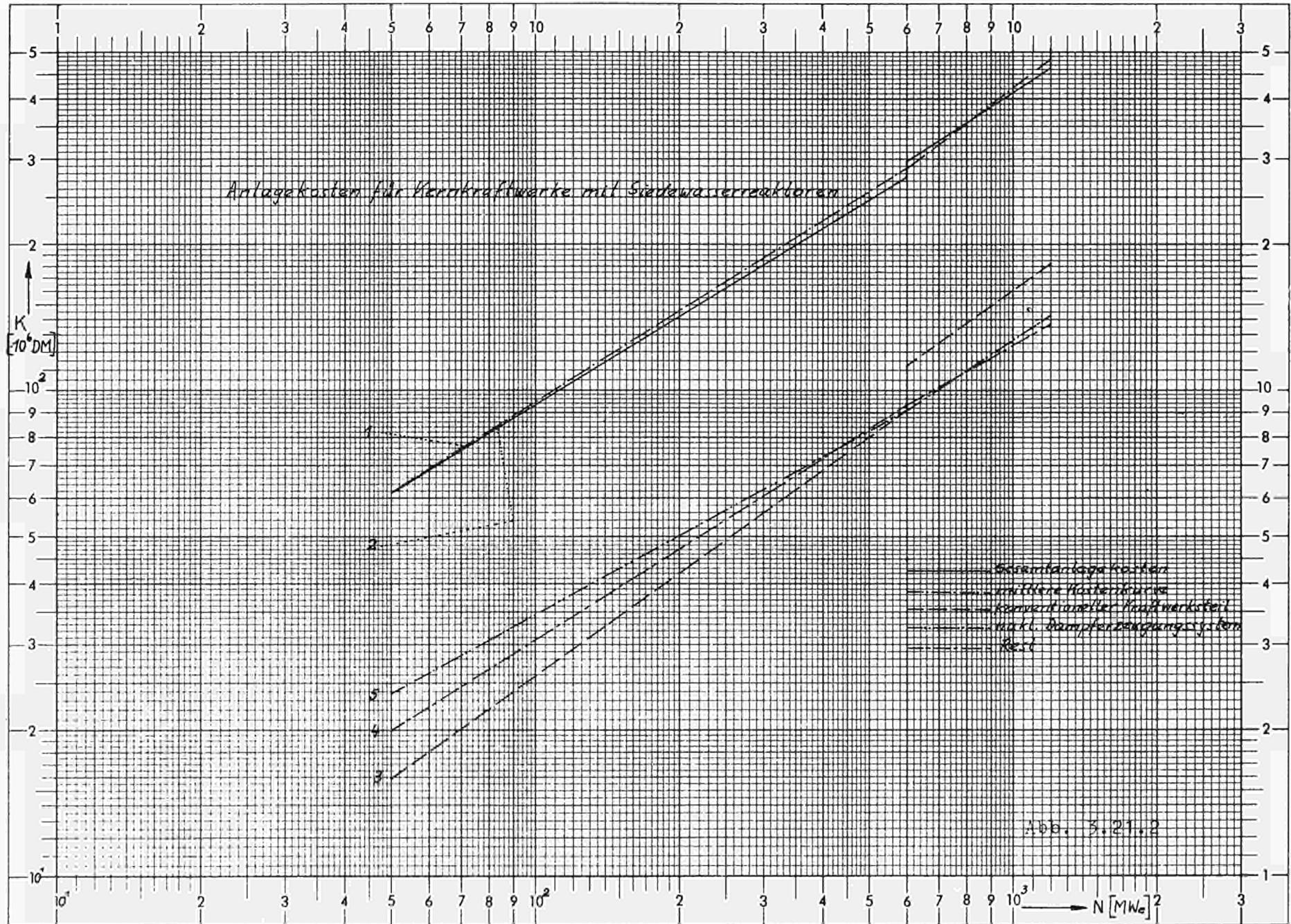
$$N > 740 \text{ MWe}$$

unter die spez. Anlagekosten einer 600 MWe-Anlage sinken.

Der Bau von Anlagen im Leistungsbereich

$$600 \text{ MWe} < N \leq 740 \text{ MWe}$$

läßt sich aus diesem Grunde wirtschaftlich nicht vertreten, sofern man bei $N > 600 \text{ MW}_e$ auf zwei Turbosätze übergehen muß.



direkte Anlagentypen: Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktoren

mit folgenden Annahmen

$600 \text{ MW} = N_{\text{Reaktor}} \rightarrow z_1 = 1$
 $z_2 = 1$
 $600 \text{ MW} = N_{\text{Kond.}} \rightarrow z_3 = 1$
 $z_4 = 2$

$$\frac{K_A}{K_{A,600}} = 0,71 \left(\frac{N}{600}\right)^{z_1} + 0,37 z_2 \left(\frac{N_A}{600}\right)^{z_2} + 0,35 z_3 \left(\frac{N_K}{600}\right)^{z_3}$$

N	m ₁	m ₂	m ₃
< 600	0,62	0,34	0,7
> 600	0,55	0,64	0,7

$$K_{A,600} = 2,76 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

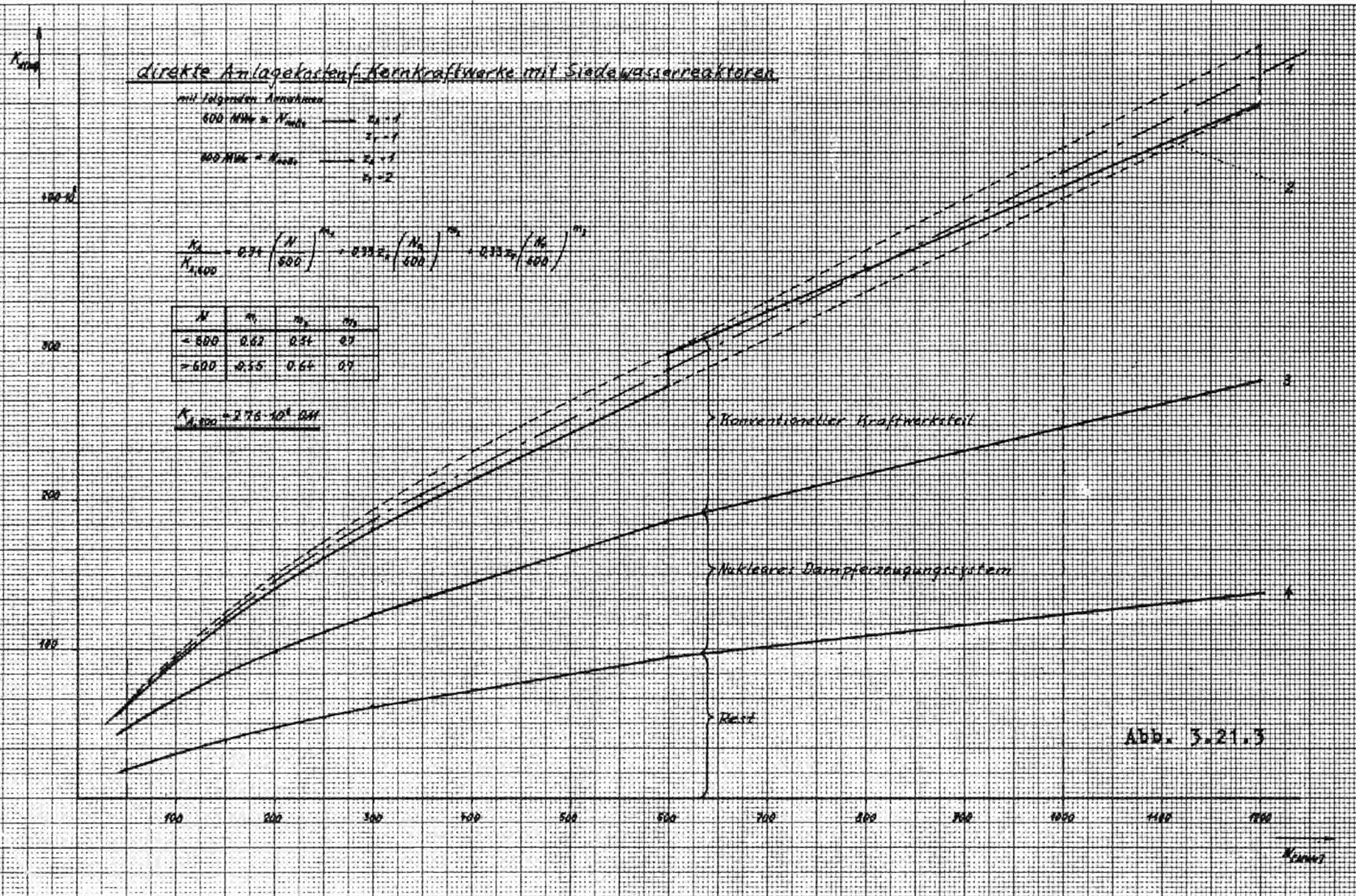


Abb. 3.21.3

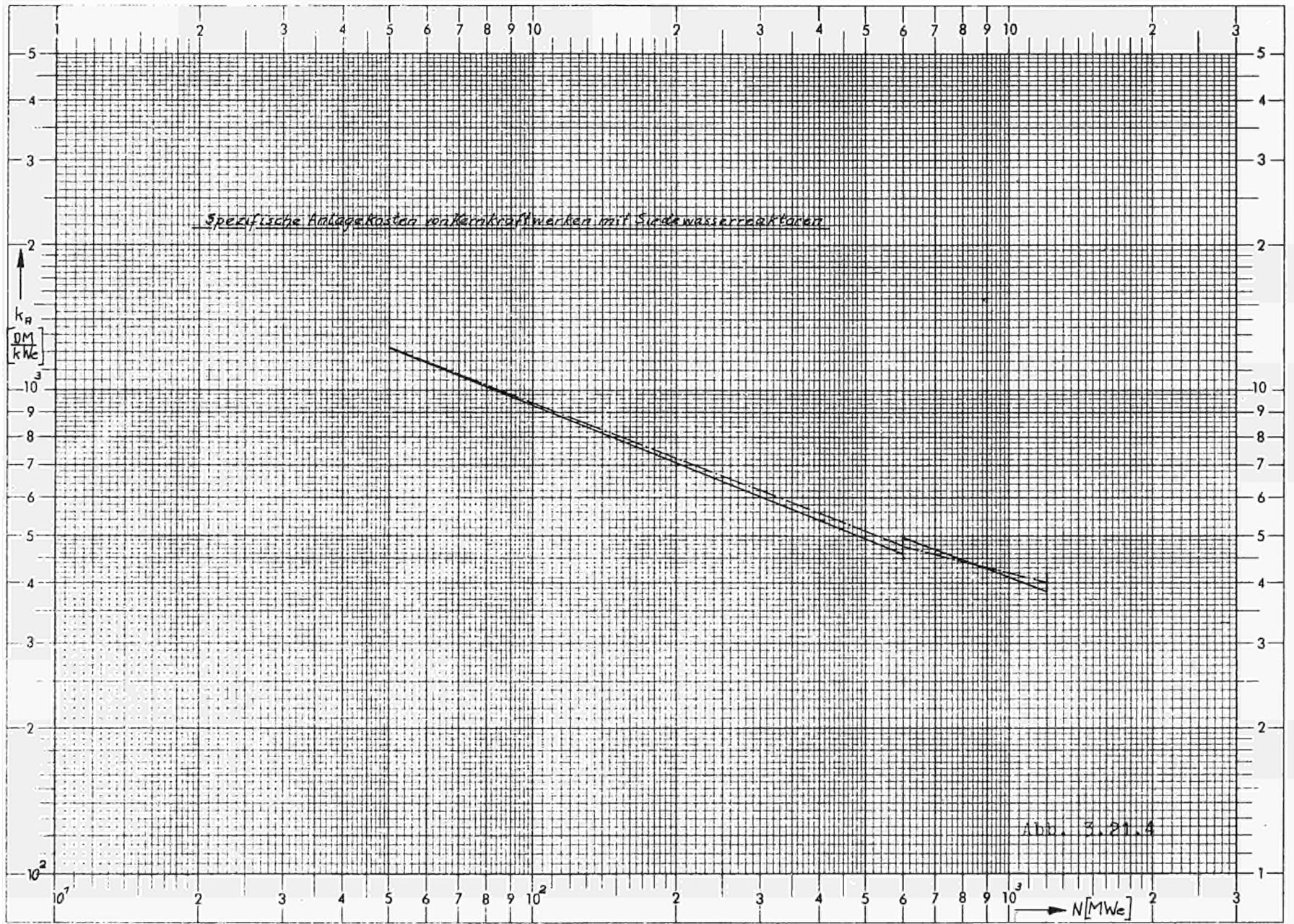
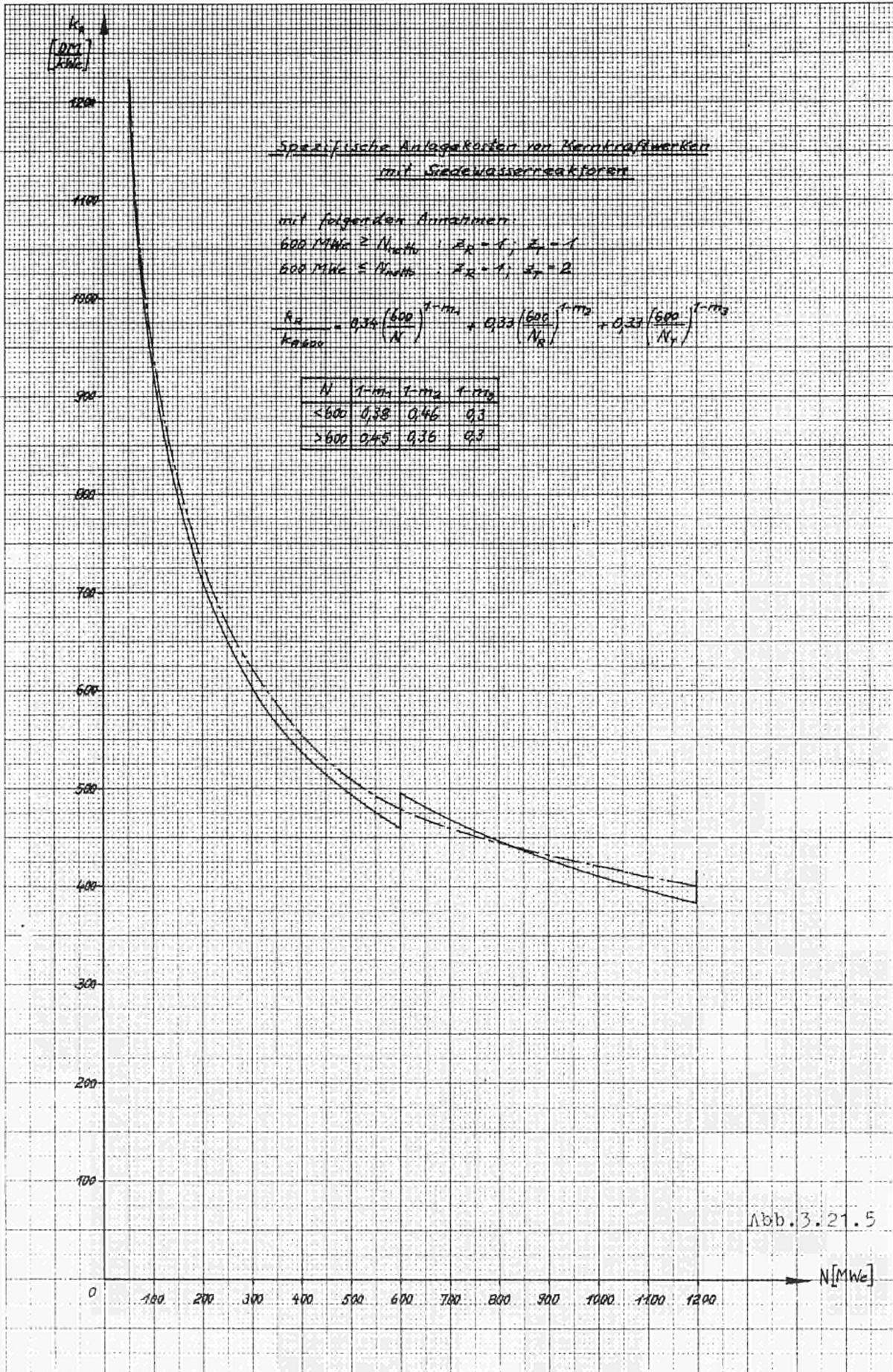
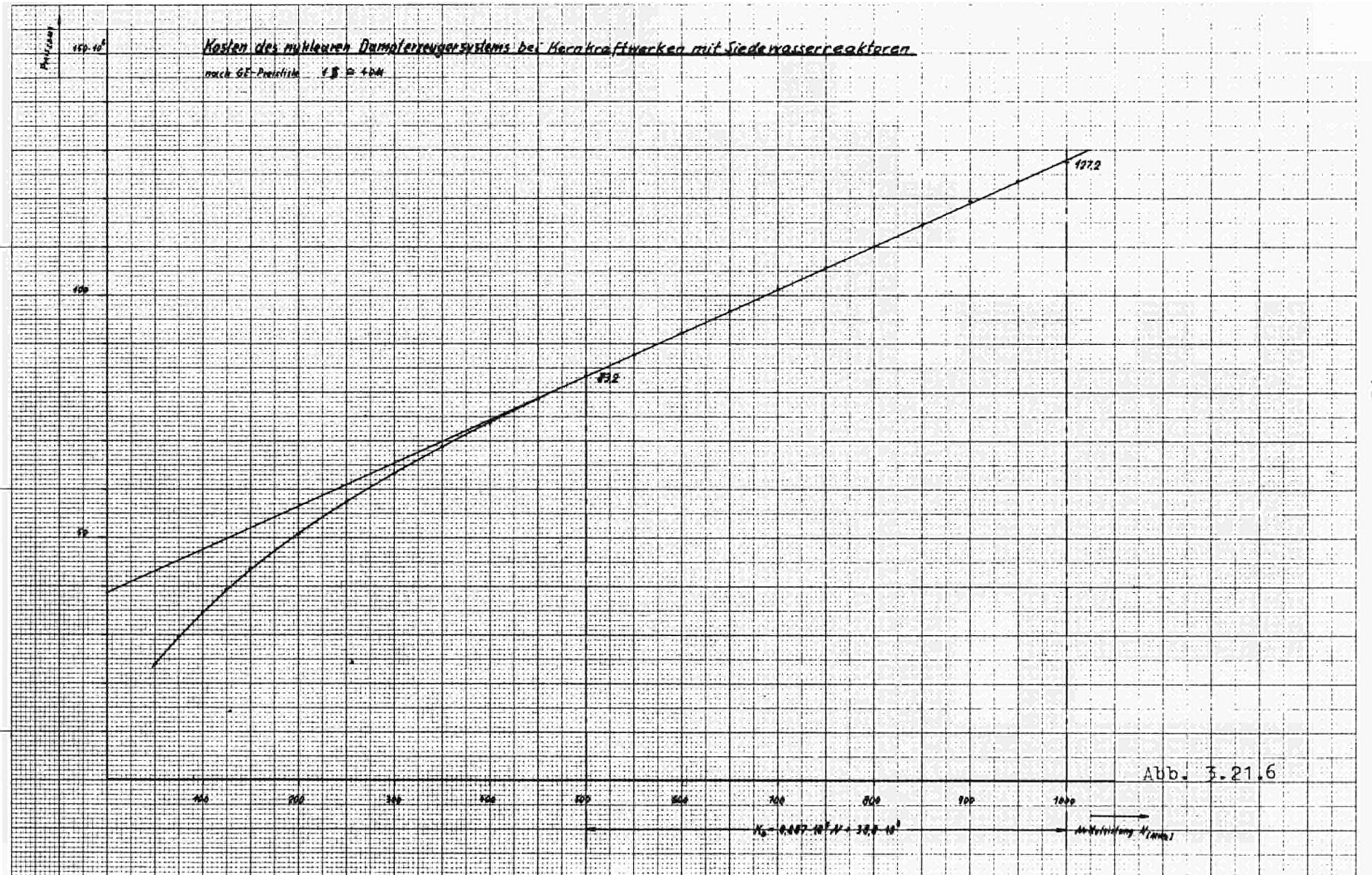


Abb. 3.21.4





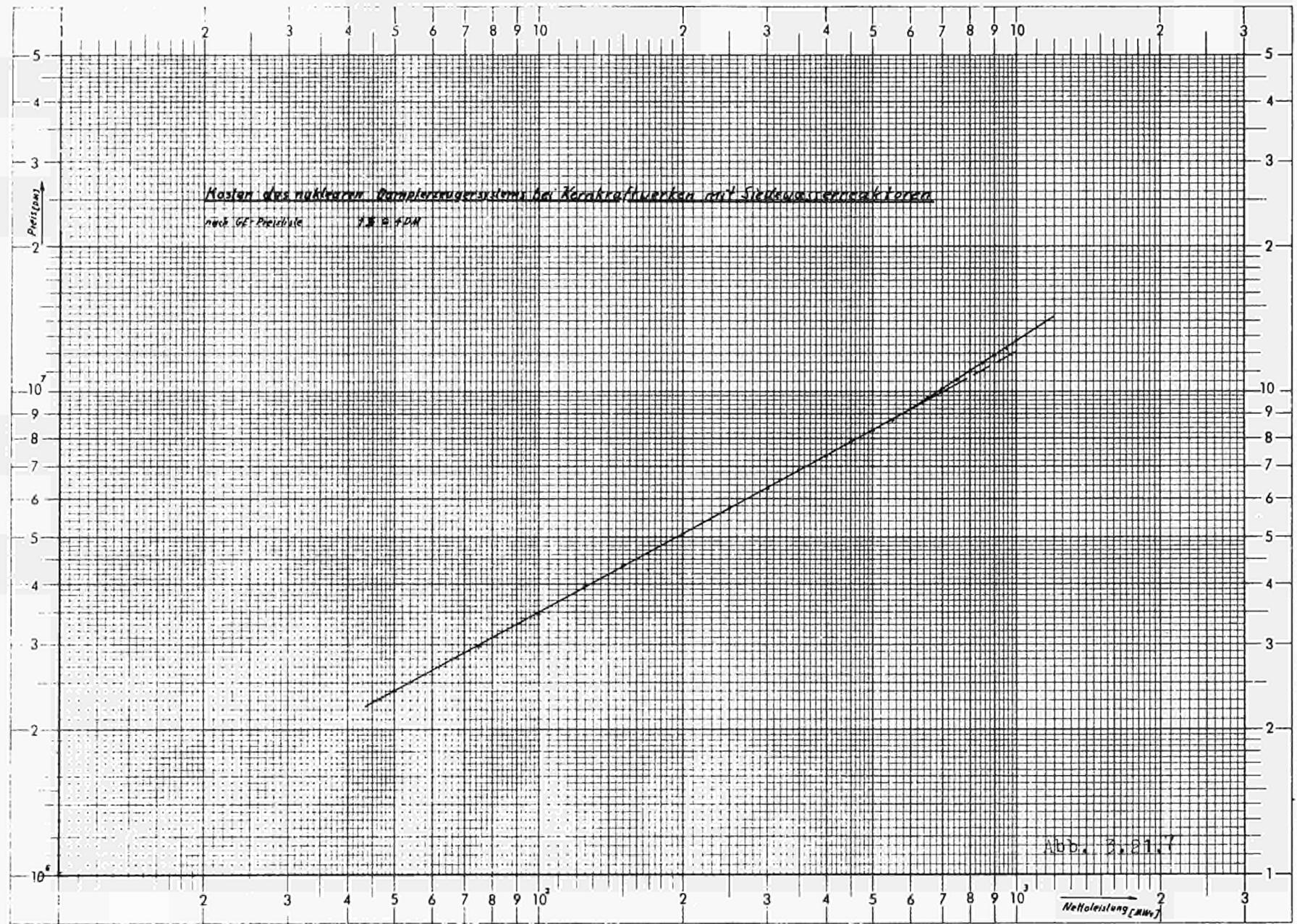


Abb. B.81.7

3.2.2 Abschätzungsformeln für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren

Für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren ist das uns zugängliche Datenmaterial nicht so umfangreich wie das für Kraftwerke mit Siedewasserreaktoren. Oberhalb von 600 MW_e liegen überhaupt keine Kostendaten vor. Der Verlauf der mittleren Kostenkurve muß daher zunächst einmal aus den vorhandenen Angaben für $N \leq 600 \text{ MW}_e$ ermittelt und dann für den Bereich $N > 600 \text{ MW}_e$ extrapoliert werden.

Die von deutschen Herstellerfirmen angegebenen direkten Anlagekosten für Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren und Leistungen $N \leq 600 \text{ MW}_e$ sind in Abb. 3.22.1 im logarithmischen Netz dargestellt.

Eine Approximation dieser Werte nach der Fehlerquadrat - Methode (siehe Tabelle 3.22.1, Seite 73) durch eine Gerade im doppelt - logarithmischen Netz liefert folgendes Ergebnis:

$$\begin{aligned}\Delta &= 54,4044 \cdot 10^{-2} \\ \Delta_m &= 28,5210 \cdot 10^{-2} \\ \Delta_c &= 379,6837 \cdot 10^{-2} \\ m &= \frac{\Delta_m}{\Delta} = 0,52424 \approx 0,524 \\ c &= \frac{\Delta_c}{\Delta} = 6,97891 = \lg c \\ c &= 9,525 \cdot 10^6 \approx 9,53 \cdot 10^6 \\ \frac{K_A}{[\text{DM}]} &= 9,53 \cdot 10^6 \left(\frac{N}{[\text{MW}_e]} \right)^{0,524}\end{aligned}$$

Der Exponent $m = 0,524$ liegt, besonders im Vergleich mit dem Exponenten $m = 0,62$ (Gleichung 3.11.6) für Siedewasserreaktor - Anlagen, viel zu niedrig. Eine Extrapolation mit diesem Exponenten würde für Anlagen mit $N > 600 \text{ MW}_e$ eine zu optimistische und für Anlagen mit $N < 250 \text{ MW}_e$ eine zu pessimistische Schätzung der Anlagekosten liefern.

Berücksichtigt man die Werte mit den größten Abweichungen ($\nu = 0$ und 3 in Tabelle 3.22.1, Seite 75) nicht, dann ergibt die Ausgleichsrechnung

ν	$\frac{N_\nu}{[MWe]}$	$x_\nu = \lg N_\nu$	x_ν^2	$\frac{K_\nu}{[DM]}^{*)}$	$y_\nu = \lg K_\nu$	$x_\nu y_\nu$
0	250	2,39794	5,750116	$175 \cdot 10^6$	8,24308	19,766411
1	300	2,47712	6,136123	$186 \cdot 10^6$	8,26951	20,484568
2	500	2,69897	7,284439	$250 \cdot 10^6$	8,39794	22,665788
3	513	2,71012	7,344350	$246 \cdot 10^6$	8,39094	22,740454
4	600	2,77815	7,718117	$276 \cdot 10^6$	8,44091	23,450114
$\sum_{\nu=0}^4$		13,06230	34,233545		41,74238	109,107335
$\sum 1,24$		7,95424	21,138679		25,10836	66,600470

*) nach Angaben deutscher Firmen

Tabelle 3.22.1

$$\Delta = 0,146103$$

$$\Delta_m = 0,083489$$

$$\Delta_c = 1,001440$$

$$m = \frac{\Delta_m}{\Delta} = 0,571436 \approx 0,57 \quad 3.22.1$$

$$C = 6,85434 = \lg c$$

$$c = 7,151 \cdot 10^6$$

$$\frac{K_A}{[DM]} = 7,151 \cdot 10^6 \left(\frac{N}{[MW_e]} \right)^{0,57} \quad 3.22.2$$

Bei der Extrapolation der Anlagekosten für $N > 600 \text{ MW}_e$ wird folgende Annahme gemacht:

Die Kostenkurve (Abb. 3.22.2) verlaufe im linearen Netz für $N > 400 \text{ MW}_e$ linear nach der Gleichung

$$K_A = a_1 N + a_0$$

Die Approximation der aus Gleichung 3.22.2 im Bereich $400 \text{ MW}_e \dots 600 \text{ MW}_e$ berechneten Punkte durch eine Gerade im linearen Netz ergibt

Tabelle 3.22.2

ν	N_ν	N_ν^2	K_ν	$N_\nu \cdot K_\nu$
	MW_e		DM	
1	350	$12,25 \cdot 10^4$	$201,59 \cdot 10^6$	$7,05565 \cdot 10^{10}$
2	400	16,00	217,53	8,7012
3	450	20,25	233,19	10,49355
4	500	25,00	247,07	12,3535
5	550	$30,25 \cdot 10^4$	$260,87 \cdot 10^6$	$14,34785 \cdot 10^{10}$
$\sum_{\nu=1}^5$	2250	$103,75 \cdot 10^4$	$1160,25 \cdot 10^6$	$52,95175 \cdot 10^{10}$

$$\Delta = 12,5 \cdot 10^4 \quad a_1 = \frac{\Delta_{a_1}}{\Delta} = 0,962 \cdot 10^6$$

$$\Delta_{a_1} = 3,7025 \cdot 10^{10} \quad a_0 = \frac{\Delta_{a_0}}{\Delta} = 98,76 \cdot 10^6$$

$$\Delta_{a_0} = 1,2345 \cdot 10^3$$

$$\frac{K_A}{[\text{DM}]} = 0,296 \cdot 10^6 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 98,76 \cdot 10^6 \quad 3.22.3$$

für $N \geq 400 \text{ MW}_e$.

Mit Gleichung 3.22.3 ergeben sich die direkten Anlagekosten einer 600 MW_e - Anlage zu

$$K_{A,600} = 276,36 \cdot 10^6 \text{ DM},$$

die einer 1000 MW_e - Anlage zu

$$K_{A,1000} = 394,76 \cdot 10^6 \text{ DM}.$$

Legt man diese beiden Punkte der Kostenkurve der Bestimmung des Degressionsexponenten für $N > 600 \text{ MW}_e$ zugrunde, dann erhält man

$$m = \frac{\lg \frac{394,76}{276,36}}{\lg \frac{1000}{600}} = \frac{\lg 1,4284}{\lg 1,6667} = 0,69717 \approx 0,7 \quad 3.22.4$$

Für die folgenden Betrachtungen soll die oben festgelegte Kostenkurve als untere Grenzkurve im Sinne der Kurve 3 in Abb. 2.5.1 benutzt werden. Die Gleichung dieser unteren Grenzkurve läßt sich mit den oben ermittelten Degressionsexponenten wie folgt schreiben

$$K_A = K_{A_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.22.5$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{A_0} = 276 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

im Bereich

$$m = 0,57$$

$$50 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

$$m = 0,7$$

$$600 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

Als Bezugsanlage wurde eine 600 MW_e - Anlage mit den abgerundeten Anlagekosten von $276 \cdot 10^6$ DM gewählt. Außerdem wurde angenommen, daß die Kostenkurve im Bereich

$$50 \text{ MW}_e \leq N \leq 200 \text{ MW}_e$$

durch den gleichen Exponenten m wie im Bereich

$$200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

dargestellt werden kann.

Zur Ermittlung der mittleren Kostenkurven müssen der durch die Gleichung 3.22.5 gegebenen unteren Grenzkurve die durch den Übergang von einer 600 MW_e - Turbine auf 2 x 300 MW_e - Turbinen und durch den Übergang von 2 x 600 MW_e auf 3 x 400 MW_e - Turbinen entstehenden Kostensprünge ΔK überlagert werden (siehe Abbildung 3.22.1)

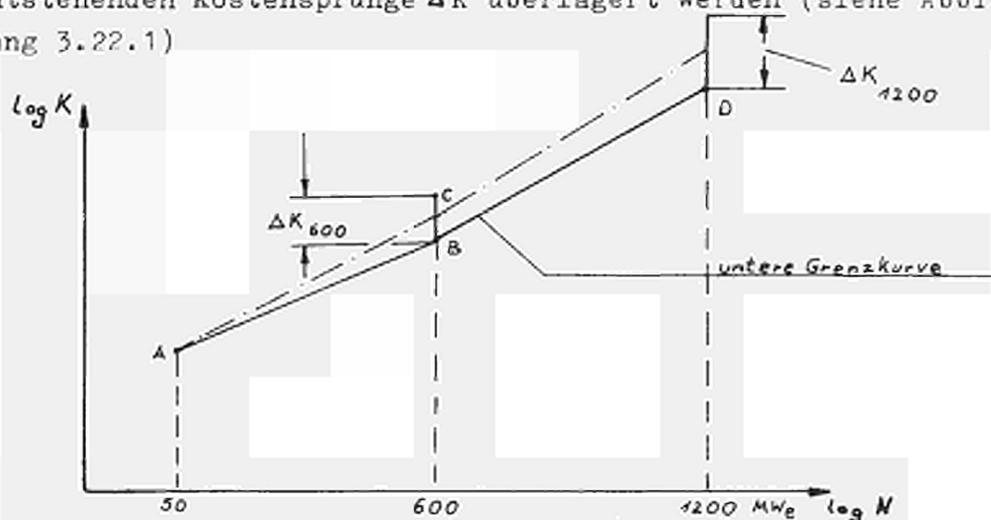


Abb. 3.22.1

Die prozentuale Aufteilung der Anlagekosten ergibt sich aus Angaben deutscher Firmen für eine 600 MW_e - Anlage zu

nukleares Dampferzeugungssystem	35%
konventioneller Kraftwerksteil	34%
Restteil	31%

der direkten Anlagekosten.

Daraus erhält man mit $276 \cdot 10^6$ DM für die direkten Anlagekosten einer 600 MW_e - Anlage

$K_{nD.,600}$	= nukleares Dampferzeugungssystem	$96,60 \cdot 10^6$ DM
$K_{kK.,600}$	= konventioneller Kraftwerksteil	$93,84 \cdot 10^6$ DM
$K_{B,600}$	= Restteil	$85,56 \cdot 10^6$ DM

Für den Kostenverlauf des konventionellen Kraftwerkteils wird ein Exponent von $m = 0,7$ angenommen (siehe Abschnitt 3.2).

Damit ergibt sich beim Übergang von einer 600 MW_e - auf eine $2 \times 300 \text{ MW}_e$ - Turbinenanlage bei einer Kraftwerksnettoleistung von $N = 600 \text{ MW}_e$ ein Kostensprung von

$$\begin{aligned}\Delta K_{600} &= 2K_{\text{kk.},300} - K_{\text{kk.},600} \\ &= 2K_{\text{kk.},600} \left(\frac{N_0}{2N_0} \right)^{0,7} - K_{\text{kk.},600} \\ &= K_{\text{kk.},600} (2 \cdot 0,5^{0,7} - 1)\end{aligned}$$

$$\underline{\underline{\Delta K_{600}}} = 0,231 K_{\text{kk.},600} = \underline{\underline{21,68 \cdot 10^6 \text{ DM}}}$$

Bei $N = 1200 \text{ MW}_e$ ergibt sich durch den Übergang von einer $2 \times 600 \text{ MW}_e$ - auf eine $4 \times 300 \text{ MW}_e$ - Turbinenanlage

$$\begin{aligned}\Delta K_{1200} &= 4K_{\text{kk.},300} - 2K_{\text{kk.},600} \\ &= 2(2K_{\text{kk.},300} - K_{\text{kk.},600})\end{aligned}$$

$$\underline{\underline{\Delta K_{1200}}} = 2 \underline{\underline{\Delta K_{600}}} = \underline{\underline{43,36 \cdot 10^6 \text{ DM.}}}$$

Die mittlere Kostenkurve geht durch die Punkte

$$\underline{\underline{K_{A,50}}} = 276 \cdot 10^6 \left(\frac{50}{600} \right)^{0,57} = \underline{\underline{66,96 \cdot 10^6 \text{ DM}}}$$

$$K_{A,m,600} = K_{A,600} + 0,5 \Delta K_{600} = (276 \cdot 10^6 + 10,84 \cdot 10^6) \text{ DM}$$

$$\underline{\underline{K_{A,m,600}}} = \underline{\underline{286,84 \cdot 10^6 \text{ DM}}}$$

$$\begin{aligned}K_{A,m,1200} &= K_{A,1200} + 0,5 \Delta K_{1200} \\ &= K_{A,1200} + \Delta K_{600} = \left[276 \cdot 10^6 \left(\frac{1200}{600} \right)^{0,7} + 21,68 \cdot 10^6 \right] \text{ DM}\end{aligned}$$

$$\underline{\underline{K_{A,m,1200}}} = \underline{\underline{470,04 \cdot 10^6 \text{ DM}}}$$

Bei gradliniger Verbindung der Punkte $K_{A,50}$ mit $K_{A,m,600}$ und $K_{A,m,1200}$ mit $K_{A,m,600}$ im doppelt - logarithmischen Netz erhält man für die mittlere Kostenkurve die Exponenten

$$m = 0,59$$

3.22.6

für den Bereich $50 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$

und

$$m = 0,71 \qquad 3.22.7$$

für den Bereich $600 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$.

Gemäß der Vereinbarung in Abschnitt 3.2 soll der Verlauf der Kostenkurve zwischen den Sprüngen bei 600 MW_e und 1200 MW_e durch die geradlinige Verbindung der Punkte C und D in Abbildung 3.22.1 dargestellt werden. Als Exponent ergibt sich

$$m = 0,59.$$

Die Kurve der direkten Anlagekosten läßt sich dann durch die Gleichung

$$K_A = K_{A_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \qquad 3.22.8$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{A_0} = 276 \cdot 10^6 \text{ DM} \qquad \text{im Bereich}$$

$$m = 0,57 \qquad 50 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

und

$$K_{A_0} = 297,68 \cdot 10^6 \text{ DM} \qquad \text{im Bereich}$$

$$m = 0,59 \qquad 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

darstellen.

Aus der durch Gleichung 3.22.8 gegebenen Kurve der direkten Anlagekosten soll durch Subtraktion der Kostenkurven des konventionellen Kraftwerkteils und des nuklearen Dampferzeugungssystems die Kostenkurve des Restteils bestimmt werden.

Dazu muß zunächst einmal die Kostenkurve des nuklearen Dampferzeugungssystems ermittelt werden. Diese Ermittlung kann sich nur auf zwei Angaben stützen. Nach Firmenangaben nimmt der Anteil der Kosten für Maschinen und Apparate des nuklearen Dampferzeugungssystems von ca. 28% der direkten Anlagekosten bei einer 250 MW_e - Anlage auf ca. 25% bei einer 600 MW_e - Anlage ab. Aus

diesen Angaben errechnet sich ein Exponent von

$$m = \frac{\lg \frac{25}{28}}{\lg \frac{600}{250}} = - \frac{0,04922}{0,38021} \approx - 0,13$$

für die Änderung des Kostenanteils.

Nimmt man an, daß sich der Anteil der Anlagekosten des gesamten nuklearen Dampferzeugungssystems an den direkten Anlagekosten mit dem gleichen Exponenten ändert, dann ergibt sich

$$p_{nD.,A} = p_{nD.,A_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-0,13} \quad 3.22.9$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

für $50 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$ $p_{nD.,A_0} = 0,35$ Anteil der Anlagekosten des nuklearen Dampferzeugungssystems der Vergleichsanlage (mit $N = 600 \text{ MW}_e$) an den direkten Anlagekosten der Vergleichsanlage.
 für $600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$ $p_{nD.,A_0} = 0,325$

Die Anlagekosten des nuklearen Dampferzeugungssystems ergeben sich mit den Gleichungen 3.22.8 und 3.22.9 nach der Beziehung

$$\begin{aligned} K_{nD.} &= p_{nD.,A} K_A \\ &= p_{nD.,A_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-0,13} K_{A_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \\ &= p_{nD.,A_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{m-0,13} \cdot K_{A_0} \\ &= K_{nD.0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{m-0,13} \end{aligned}$$

zu

$$K_{nD.} = K_{nD.0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{m'} \quad 3.22.10$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{nD.0} = 96,6 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{im Bereich}$$

$$m' = 0,44 \quad 50 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

$$m' = 0,57 \quad 600 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

Die Anlagekosten des Restteils ergeben sich nach Gleichung 2.52.2a zu

$$K_B = K_A - K_{nD} - K_{kK}, \quad 3.22.11$$

wobei K_A nach Gleichung 3.22.8, K_{nD} nach Gleichung 3.22.10 und K_{kK} mit folgender Gleichung

$$K_{kK} = K_{kK.o} Z_T \left(\frac{N_T}{N_o} \right)^{0,7} \quad 3.22.12$$

berechnet werden.

Die Ergebnisse der Gleichung 3.22.11 lassen sich durch folgende Gleichung näherungsweise darstellen (s. Abb. 3.22.4, Kurve 5)

$$K_B = K_{B.o} \left(\frac{N}{N_o} \right)^m \quad 3.22.13$$

mit

$$N_o = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{B.o} = 85,56$$

$$m = 0,59$$

im Bereich

$$50 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

und

$$m = 0,45$$

$$600 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e.$$

Mit Hilfe der Gleichungen 3.22.10 bis 13 lassen sich die direkten Anlagekosten von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren wie folgt darstellen

$$\frac{K_A}{K_{A,600}} = 0,31 \left(\frac{N}{600} \right)^{m_1} + 0,35 Z_R \left(\frac{N_R}{600} \right)^{m_2} + 0,34 Z_T \left(\frac{N_T}{600} \right)^{m_3}$$

3.22.14

mit

N	m_1	m_2	m_3
200...600 MW _e	0,59	0,44	0,7
600..1200 MW _e	0,45	0,57	

Geltungsbereich: $50 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$

(Verwendete Bezeichnungen siehe Gleichung 3.21.8)

Kostendaten der Vergleichsanlage:

$$\underline{\underline{K_{A,600} = 276 \cdot 10^6 \text{ DM}}}$$

$$\underline{\underline{k_{A,600} = 460 \text{ DM/kW}_{e,\text{netto}}}}$$

Setzt sich eine Kraftwerksanlage aus einer oder mehreren Reaktor- oder Turboanlagen gleicher Leistung zusammen, so daß die Beziehung

$$N = Z_R \cdot N_R = Z_T \cdot N_T$$

mit

N = Kraftwerksnettoleistung

N_R = Reaktor-nettoleistung

N_T = Turbinen-nettoleistung

Z_R = Zahl der Reaktoren

Z_T = Zahl der Turbinen

gilt, dann läßt sich mit

$$k_A = \frac{K_A}{N}$$

eine Beziehung für die spezifischen Kosten angeben:

$$\frac{k_A}{k_{A,600}} = 0,31 \left(\frac{600}{N} \right)^{1-m_1} + 0,35 \left(\frac{600}{N_R} \right)^{1-m_2} + 0,34 \left(\frac{600}{N_T} \right)^{1-m_3}$$

3.22.15

mit

N	$1 - m_1$	$1 - m_2$	$1 - m_3$
$< 600 \text{ MW}_e$	0,41	0,56	0,3
$> 600 \text{ MW}_e$	0,55	0,43	

Geltungsbereich: $50 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$

Bei der Beurteilung der Zuverlässigkeit der Formeln 3.22.14 und 3.22.15 ist zu beachten, daß zu ihrer Herleitung nur sehr wenige Informationen zur Verfügung standen, so daß bei ihrer Verwendung entsprechende Vorsicht angebracht ist.

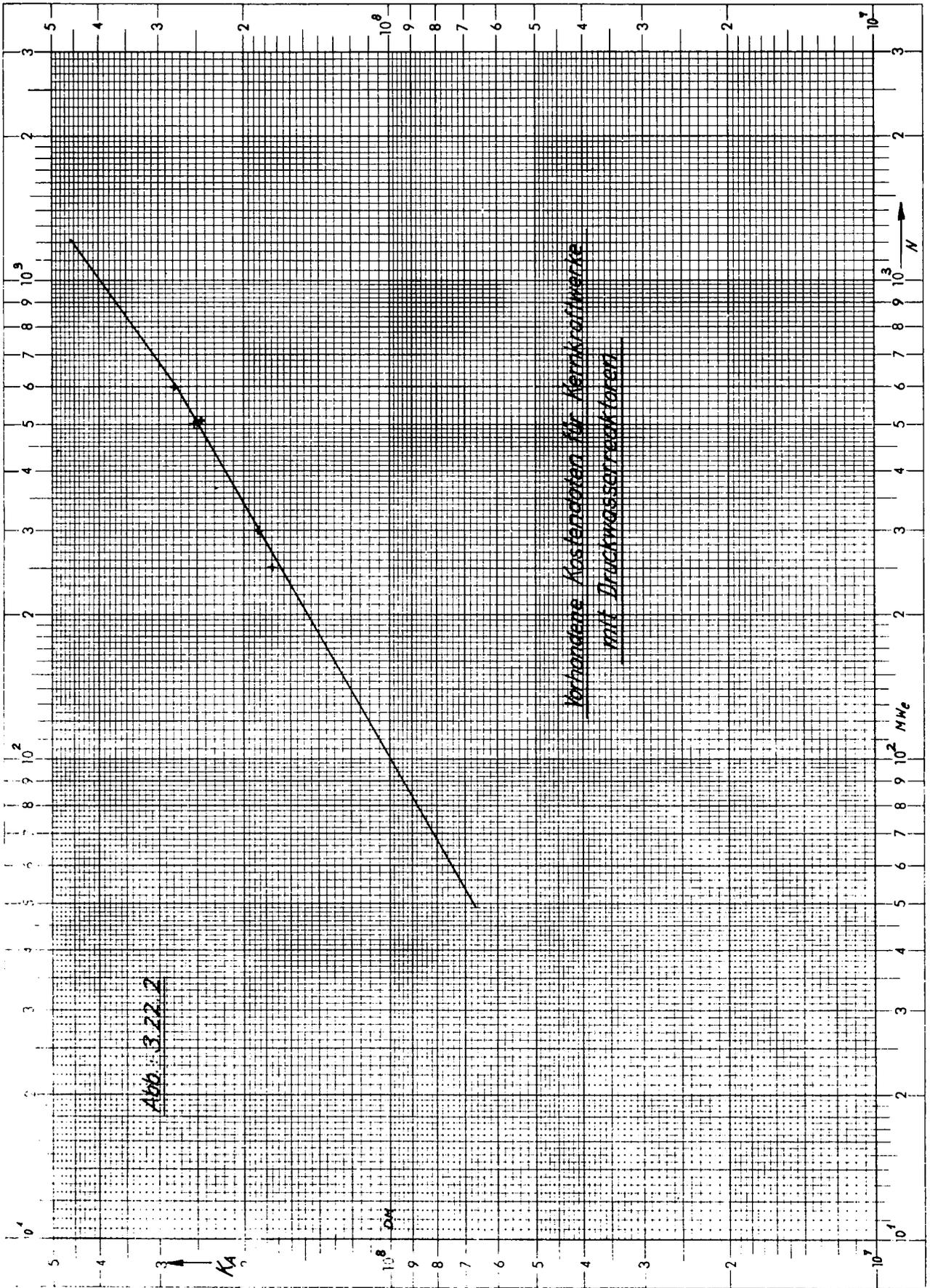
Die Abbildungen 3.22.6 und 7 zeigen den Verlauf der spezifischen Anlagekosten im logarithmischen bzw. im linearen Netz. Wie bei den Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren ist auch hier zu sagen, daß in der Nähe eines Sprunges der Bau von Kraftwerken größerer Leistung erst in dem Bereich wieder wirtschaftlich sinnvoll wird, in dem die spezifischen Anlagekosten die spezifischen Anlagekosten vor dem Sprung unterschreiten. Nach Abbildung 3.22.6 ist z. B. die Wahl einer Kraftwerksnennleistung im Bereich von

$$600 \text{ MW}_e < N \leq 730 \text{ MW}_e$$

vom wirtschaftlichen Standpunkt nicht zu empfehlen, wenn aus technischen Gründen für $N > 600 \text{ MW}_e$ auf 2 Turbinenanlagen übergegangen werden muß. Die spezifischen Anlagekosten werden in diesem Fall erst für Anlagen mit

$$N > 730 \text{ MW}_e$$

geringer als die einer 600 MW_e - Anlage.



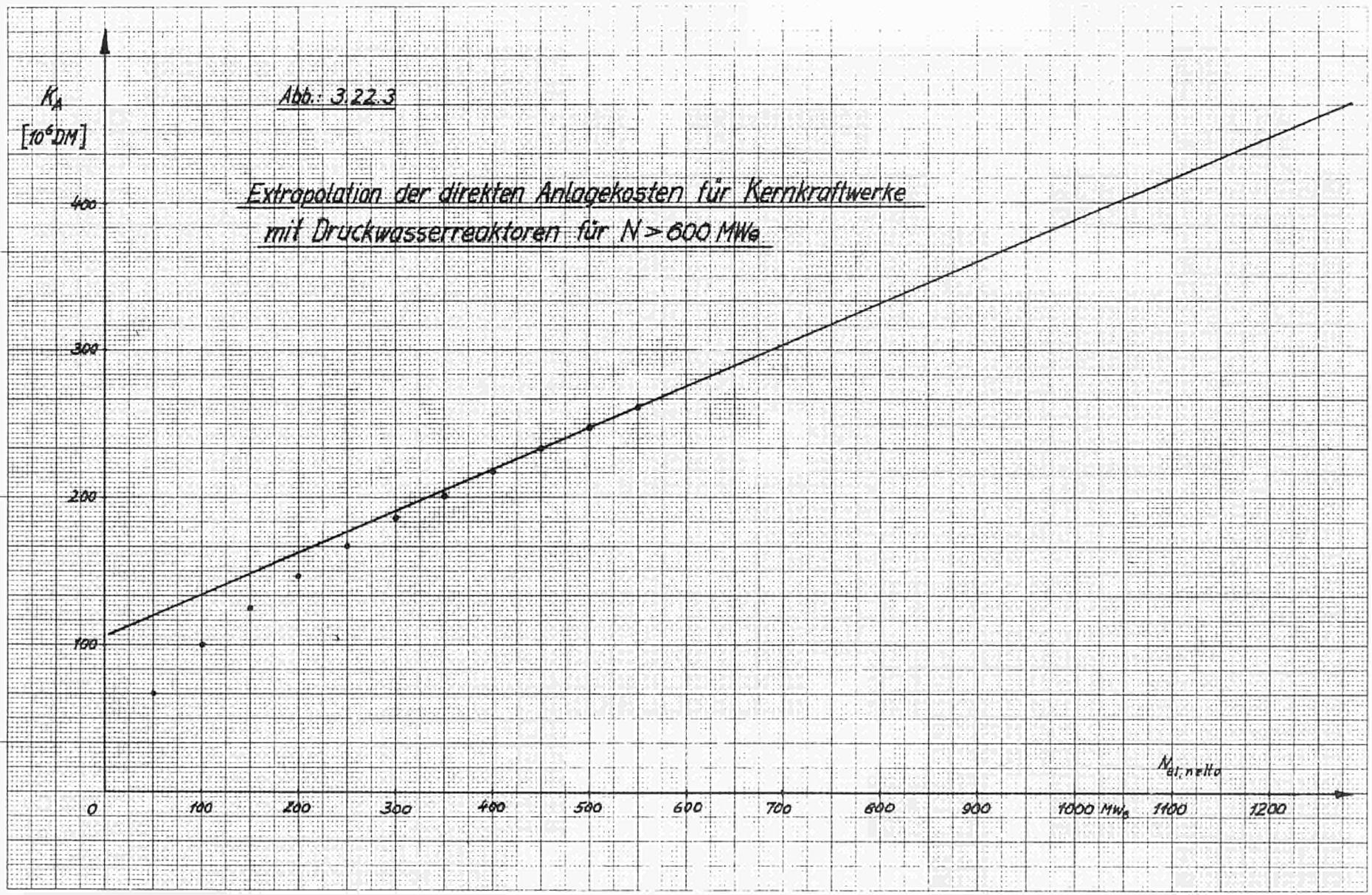
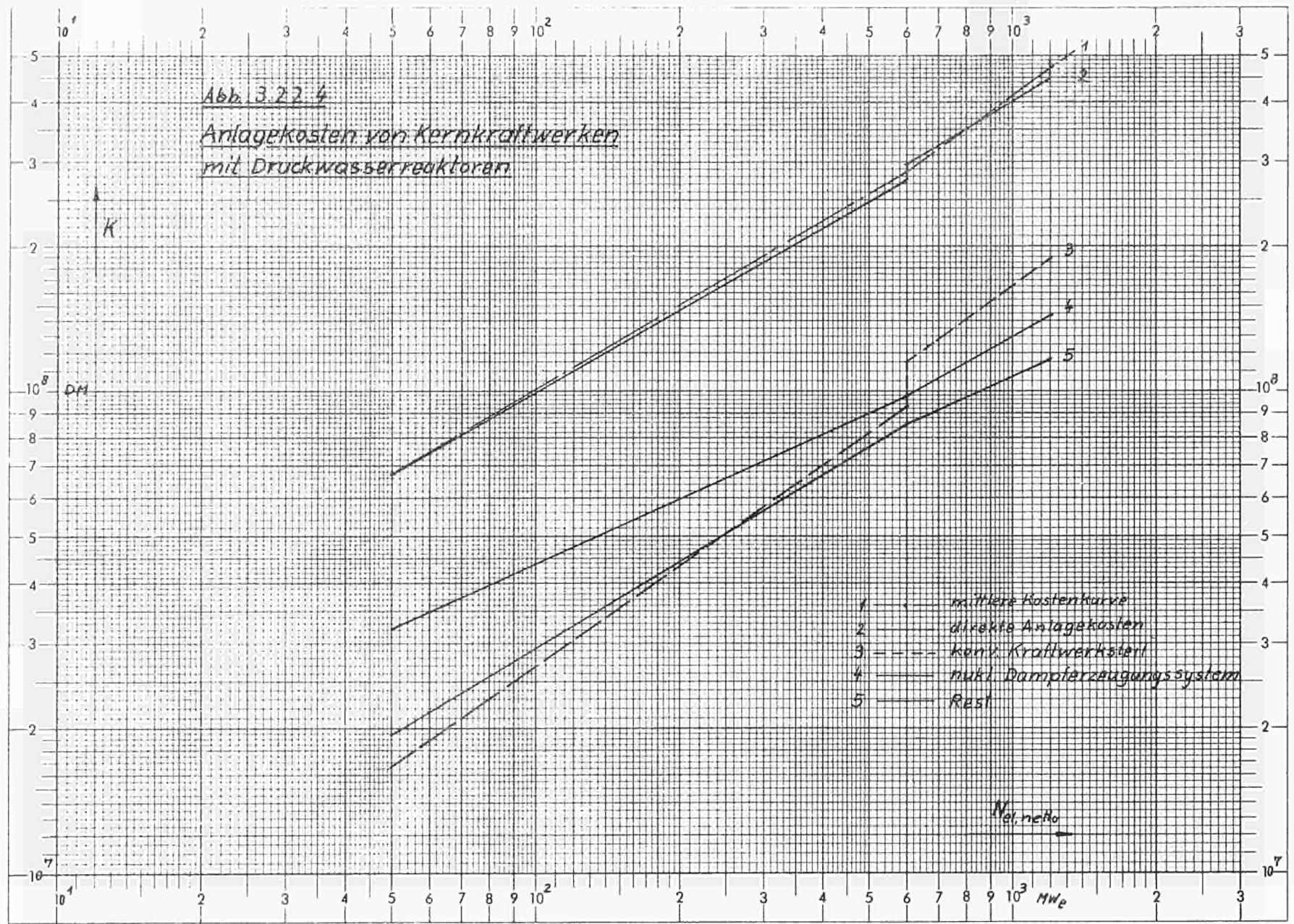
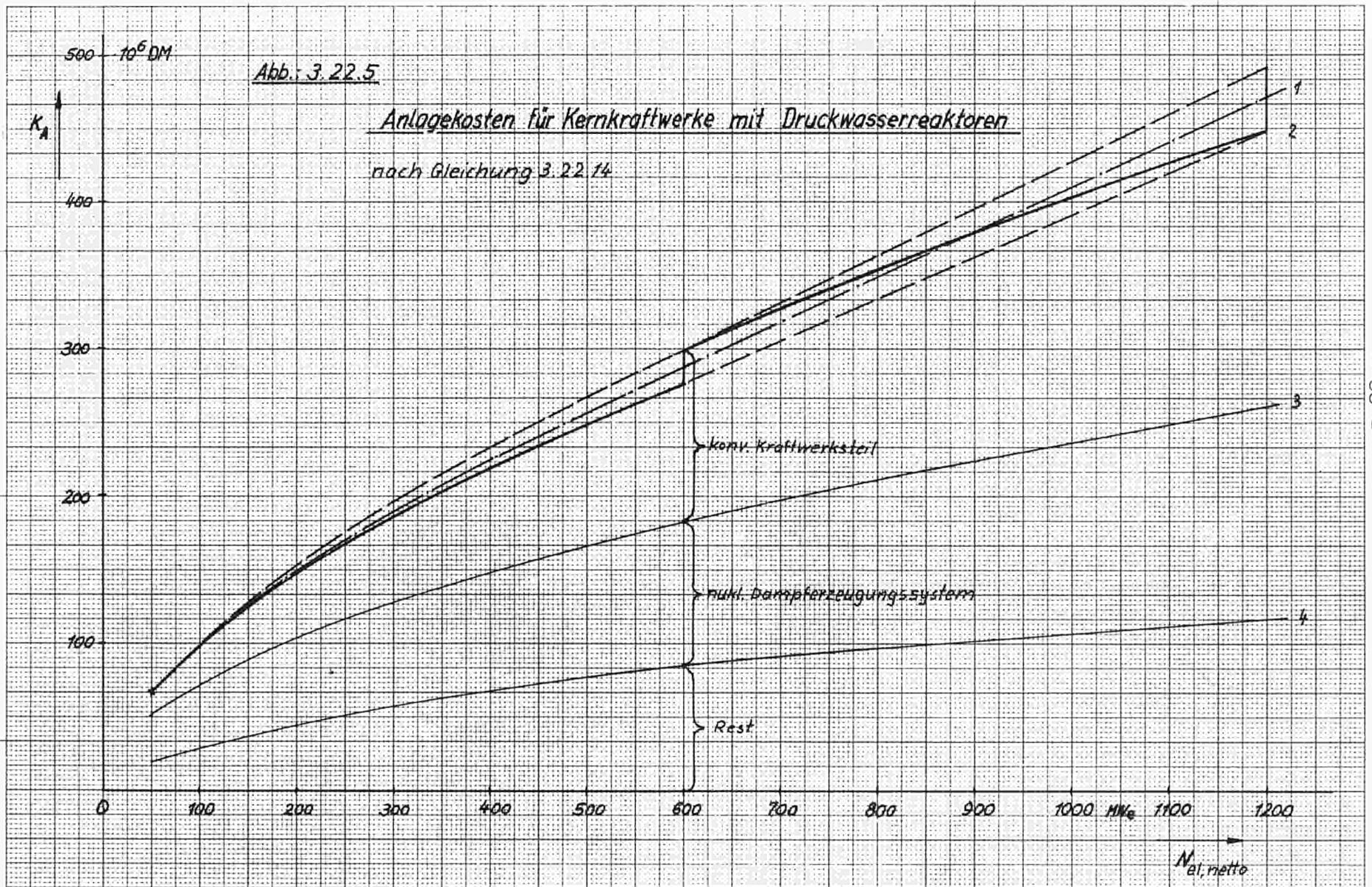
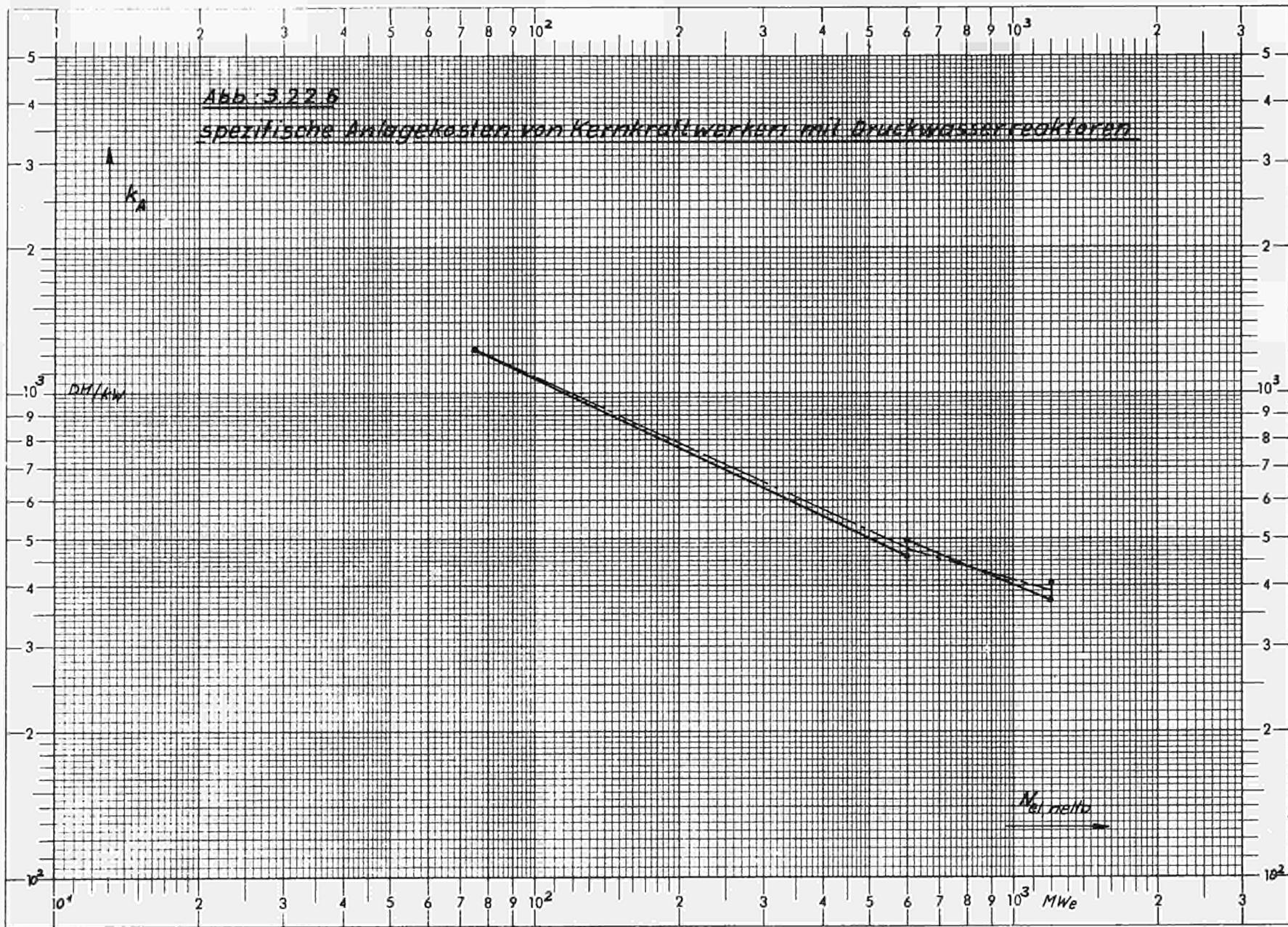
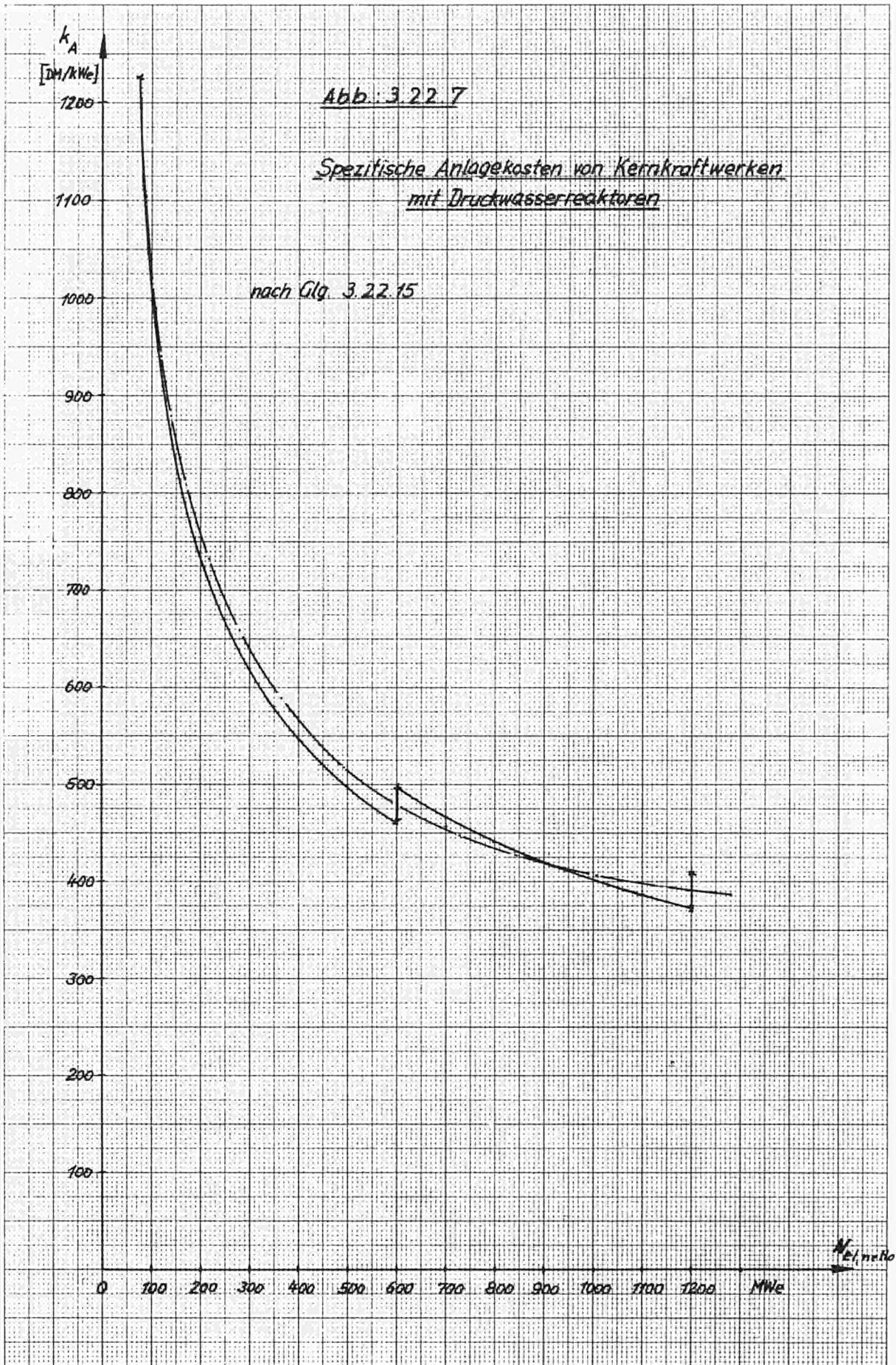


Abb. 3.22.4
 Anlagekosten von Kernkraftwerken
 mit Druckwasserreaktoren









3.3. Analyse der Kosten einzelner Anlagekomponenten

In diesem Abschnitt sollen einige ausgewählte Komponenten der Anlagensysteme analysiert werden. Die Auswahl der Komponenten erfolgt dabei nach folgenden Gesichtspunkten.

Die zur Analyse ausgewählte Komponente soll nach Möglichkeit eine in sich abgeschlossene Einheit sein, d.h. sie soll von der jeweiligen speziellen Konstruktion des Kraftwerkes möglichst unabhängig sein. Dieses Kriterium trifft z.B. für Rohrleitungen im allgemeinen nicht, für das Reaktordruckgefäß aber recht gut zu.

Die Komponente soll die Systemkosten wesentlich beeinflussen, d.h. ihr Kostenanteil muß über einem gewissen Mindestprozentsatz der direkten Anlagekosten liegen.

Die Analyse dieser ausgewählten Komponenten wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- a) Bestimmung der Abhängigkeit der Komponentenhauptabmessungen von der Kraftwerksnennleistung (Bestimmung der Einflußgrößen), Aussagen über die Grenzgröße der Komponente.
- b) Ermittlung der für die Kosten der Komponente maßgeblichen Einflußgröße und Bestimmung der Kosten in Abhängigkeit von dieser Einflußgröße.
- c) Entwicklungstendenzen und Einfluß des Standortes auf die Kosten der Komponente.
- d) Diskussion der Verbesserungs- und Verbilligungsmöglichkeiten.

Für Komponenten - im Sinne der Gliederung in Abschnitt 2.2.3. und 2.2.4. - , die diese Kriterien oder eines von ihnen nicht erfüllen, werden allgemeine Aussagen über den Kostenverlauf in Abhängigkeit von der Leistung gemacht.

Da die einzelnen Komponenten von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren, soweit sie auch bei Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren vorhanden sind, sich im Prinzip nicht grundlegend unterscheiden, werden die Untersuchungen soweit es geht für beide gemeinsam durchgeführt, die speziellen Ergebnisse jedoch innerhalb des gleichen Abschnittes nach Siede- und Druckwasserreaktoren getrennt aufgeführt.

3.3.1 Analyse ausgewählter Komponenten des nuklearen Teils

Unabhängig von der Detail-Konstruktion des Kraftwerkes lassen sich nur folgende Komponenten untersuchen

- a) das Druckgefäß mit Einbauten
- b) die Steuerstäbe mit den Steuerstabantrieben
- c) der Umwälzkreis
- d) die Verdampfer (nur bei Druckwasserreaktoren erforderlich)

Über einen Teil der elektrotechnischen Anlagen (z.B. Pumpenantriebe) und der Instrumentierung lassen sich unabhängig von dem Kraftwerksentwurf Aussagen machen.

Alle anderen Komponenten sind mehr oder weniger an die spezielle Ausführung des einzelnen Kraftwerkes gebunden, ihre Kosten lassen sich nur global abschätzen.

3.3.1.1 Untersuchungen zum Reaktordruckgefäß.

Zur Bestimmung der Kostenfunktion muß zunächst einmal die Druckgefäßgröße in Abhängigkeit von der Leistung ermittelt werden.

3.3.1.1.1 Der Innendurchmesser des Reaktordruckgefäßes als Funktion der Leistung.

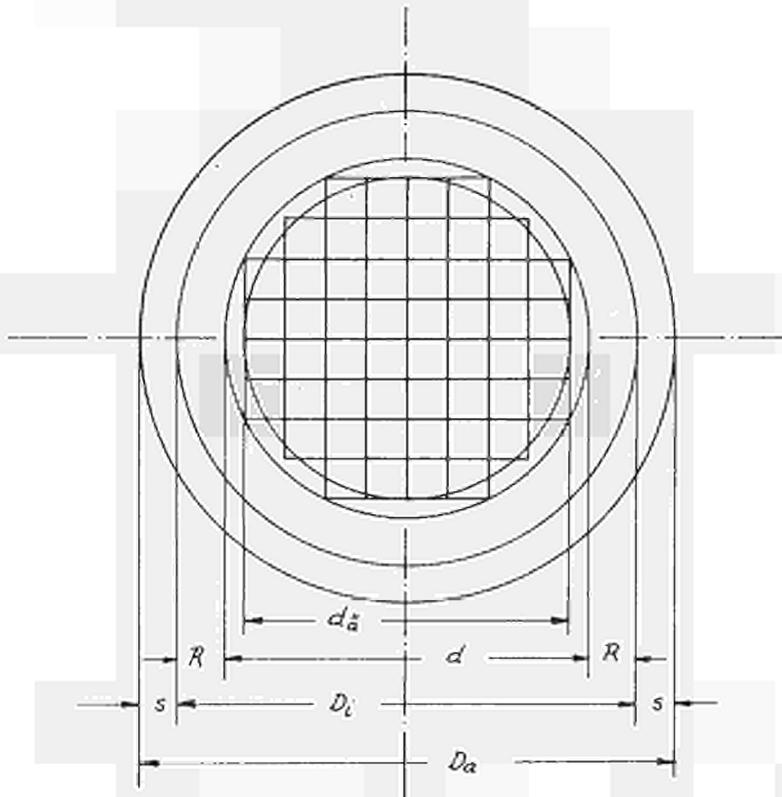


Abb.3.3.111.1

Wie aus der Abb. 3.3.111.1 hervorgeht, setzt sich der Innendurchmesser D_i aus zwei Anteilen zusammen, dem unbeschriebenen Durchmesser des Kerns d und dem Zwischenraum zwischen Kern und innerer Druckgefäßwand.

$$D_i = d + 2R$$

3.3.111.1

mit

D_i = Druckgefäßinnendurchmesser

- d = Kerndurchmesser (Durchmesser des umbeschriebenen Kreises)
 R = Reflektordicke

Von diesen beiden Anteilen wird sich allein der Kerndurchmesser d mit der Kraftwerksnennleistung ändern, während der Zwischenraum R, der als Reflektor, Abschirmung und Rückströmraum dient, relativ unabhängig von der Leistung ist. Der Kerndurchmesser läßt sich aus folgender Beziehung ermitteln

$$N_{th} \sim V_K n = d^2 \cdot h \cdot n \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$d = 1,128 \cdot a \left(\frac{N_{th}}{h \cdot n} \right)^{0,5} = c \left(\frac{N_e}{h \cdot n \cdot \gamma} \right)^{0,5} \quad 3.3.111.2$$

N_{th} = thermische Reaktorleistung in MW_{th}

$N = N_e$ = Reaktor-Nettoleistung in MWe

n = Leistungsdichte im Reaktorkern in $\frac{MW_{th}}{m^3}$

h = aktive Kernhöhe in m

γ = Gesamtwirkungsgrad (Nettowirkungsgrad)

V_k = Volumen des Reaktorkerns in m³

a, c = Proportionalitätsfaktoren

Der Proportionalitätsfaktor a in Gleichung 3.3.111.2 berücksichtigt Randeffekte, die dadurch entstehen, daß der Kern nur angenähert Kreisform besitzt. Durch die endliche Gitterteilung wird nicht der ganze Kreisquerschnitt (siehe Abb. 3.3.111.1) mit Brennelementbündeln ausgefüllt, während sich die Leistungsdichte nur auf das mit Brennelementen erfüllte Volumen bezieht. Aus diesem Grunde würde bei Vernachlässigung des Proportionalitätsfaktors ein äquivalenter Durchmesser d_a , der kleiner als der Durchmesser des umbeschriebenen Kreises ist, berechnet. Die Größe dieser Konstante hängt von der Größe der Teilung der Brennelementbündel ab. Er wird also bei kleinen Kerndurchmessern größer sein, als bei großen, wenn

man gleiche Teilung voraussetzt.

In den Abb. 3.3.111.2 und Abb. 3.3.111.4 sind die Kerndurchmesser einiger Siede- bzw. Druckwasserreaktoren über der Einflußgröße

$$\frac{N}{n \cdot h \cdot \eta} = L \quad 3.3.111.2b$$

in logarithmischen Netz aufgetragen. Eine Ausgleichsrechnung ergibt mit der Näherungsfunktion

$$y = m x + c$$

$$\log L = m \log \frac{N}{n \cdot h \cdot \eta} + \log c \quad 3.3.111.3$$

nachfolgende Werte für die Konstanten m und c. Dabei wurde m nur zur Kontrolle der Richtigkeit der in Gleich. 3.3.111.2 abgeleiteten Beziehung als freie Konstante eingeführt. (Werte für die Ausgleichsrechnung bei Siedewasserreaktoren siehe Tabelle Seite 97)

Für den Kerndurchmesser bei Siedewasserreaktoren im Bereich:

$$10 \text{ MWe} \leq N \leq 1000 \text{ MWe} ,$$

dem entspricht ein Bereich der Einflußgröße von etwa

$$1 \text{ m}^2 < L < 25 \text{ m}^2 ,$$

ergibt sich

$$\Delta = 21,6990$$

$$\Delta_m = 10,5583$$

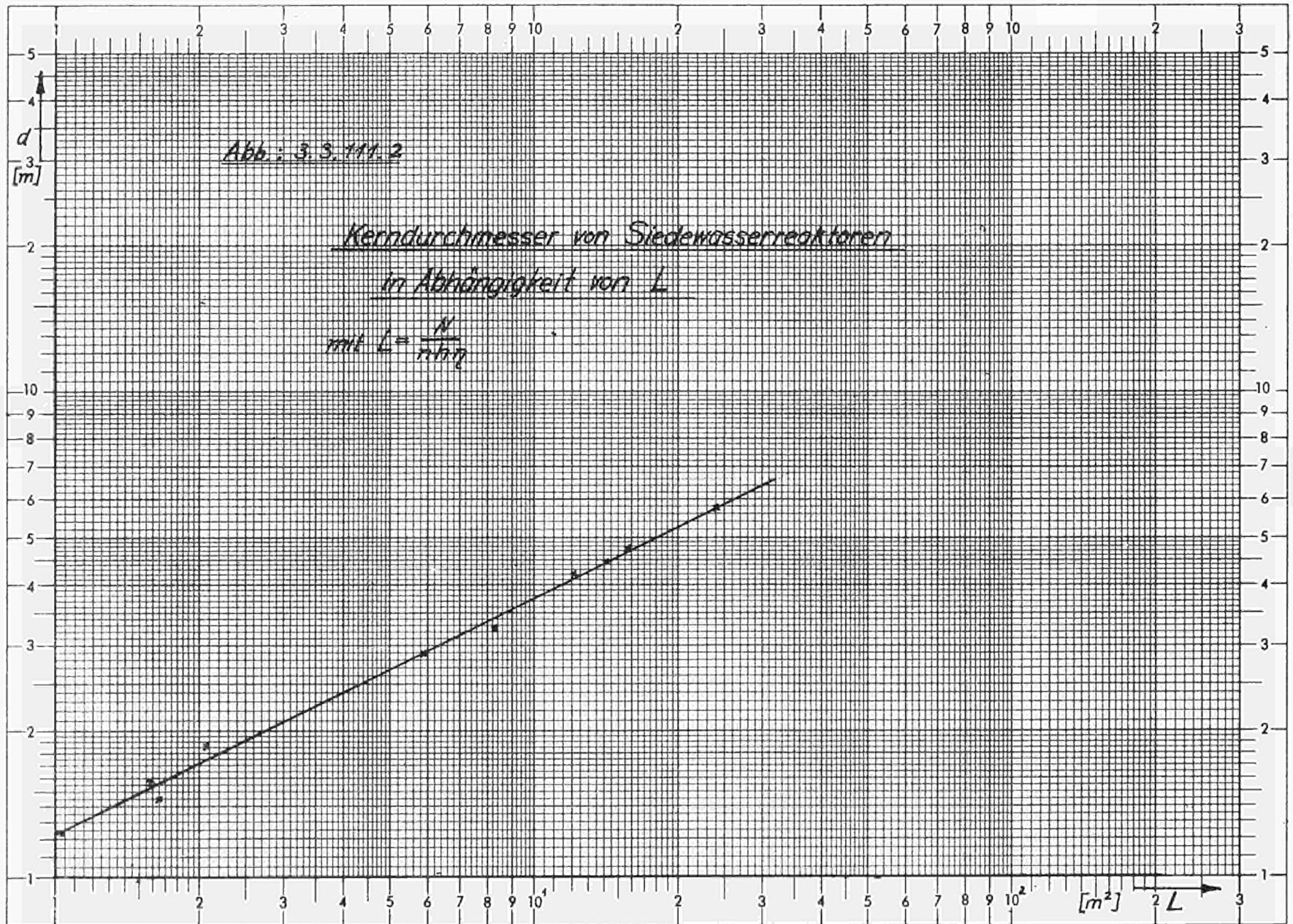
$$\Delta_c = 1,9211$$

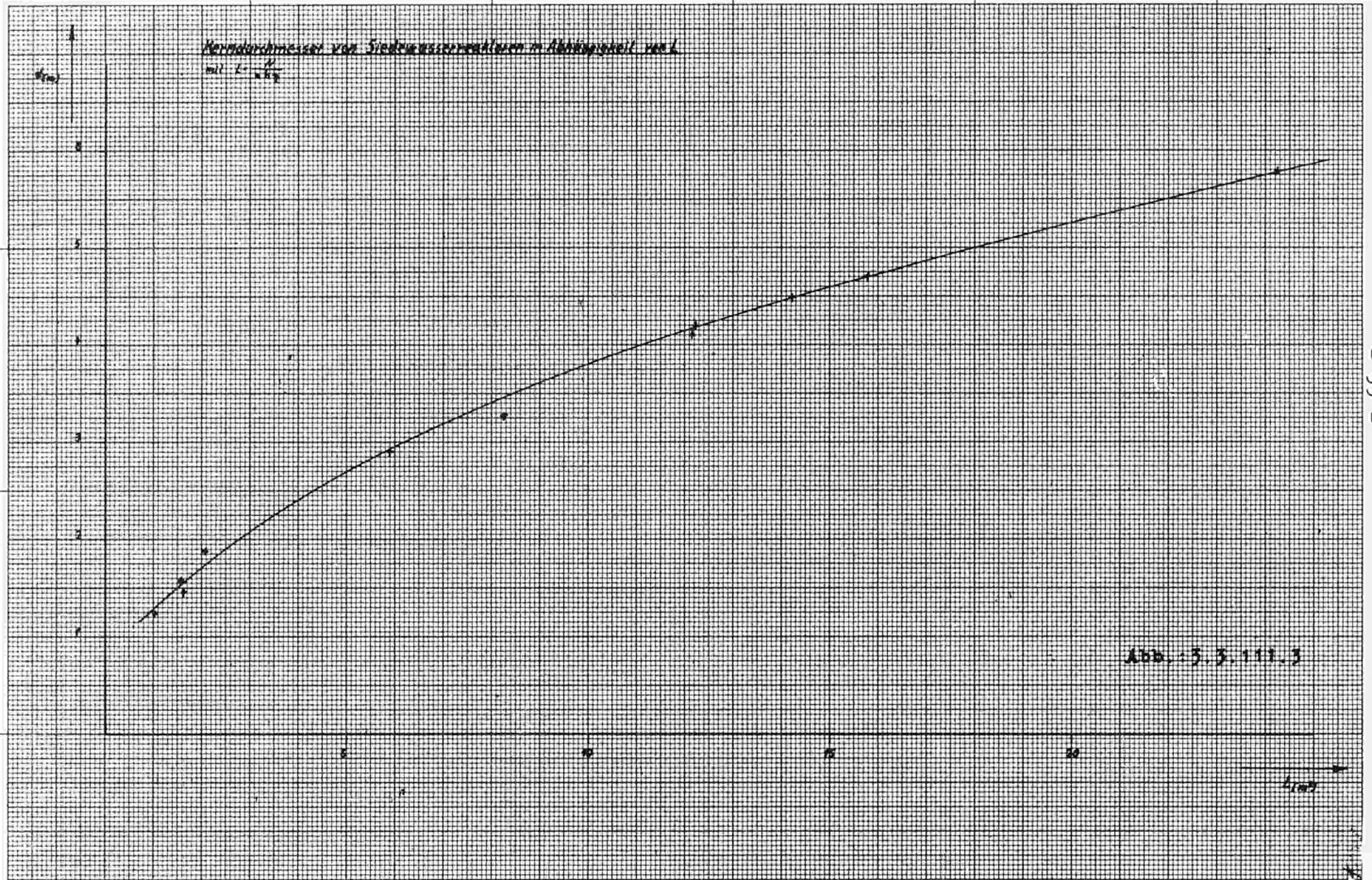
$$m = \frac{\Delta_m}{\Delta} = 0,4865 \approx 0,49$$

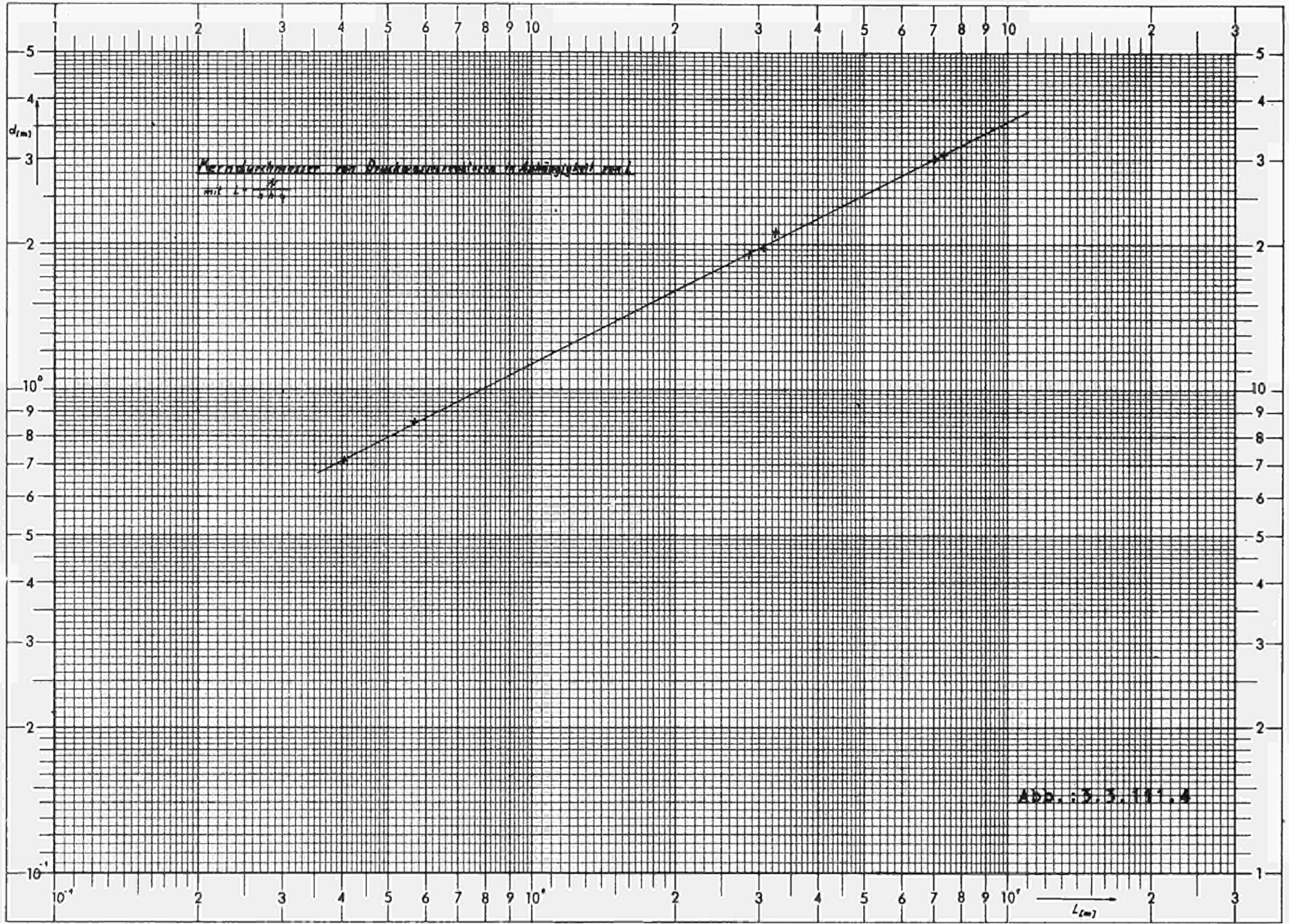
$$c = \frac{\Delta_c}{\Delta} = 0,08853 = \lg c$$

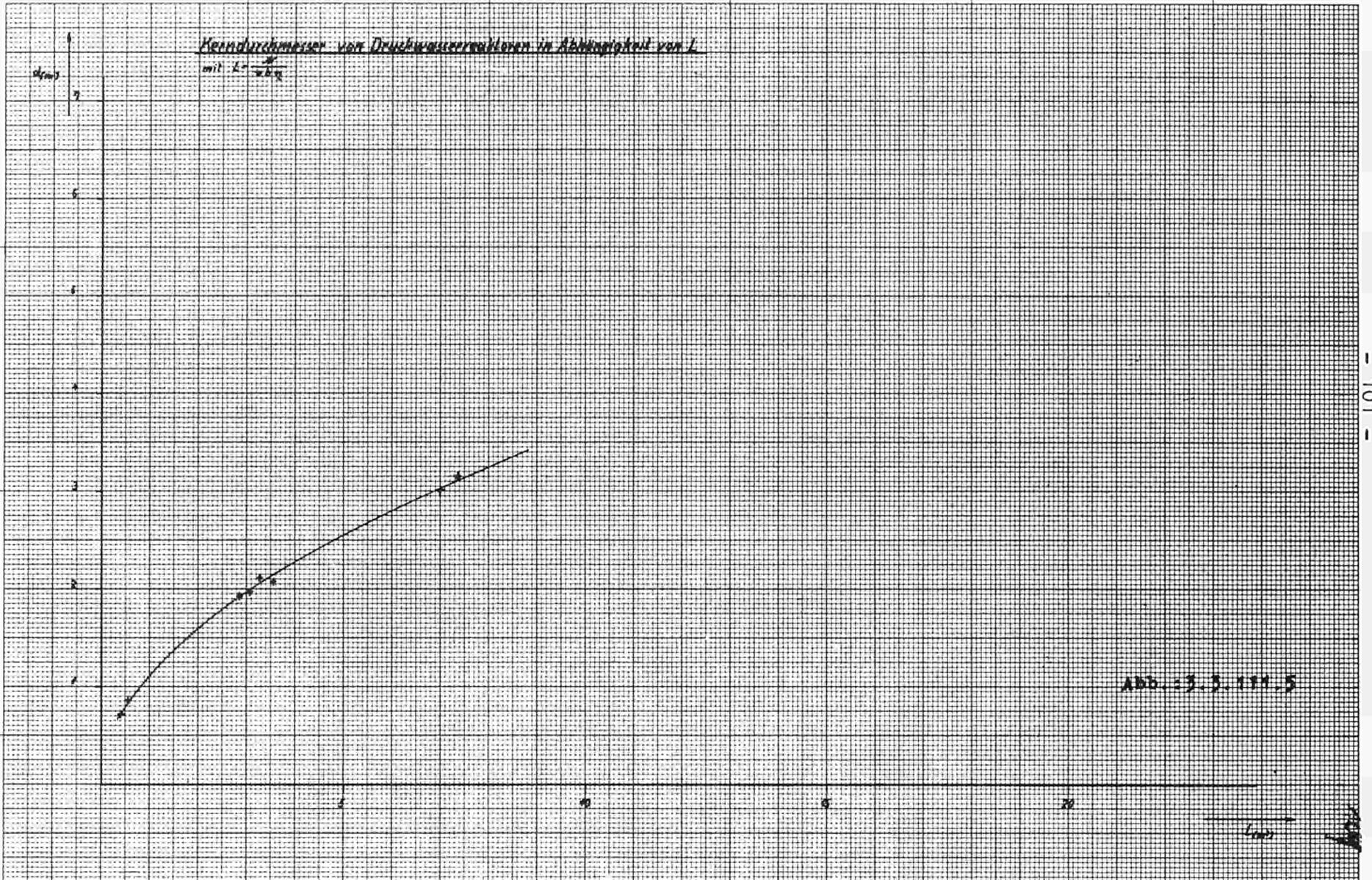
$$c = 1,2261 \approx 1,226$$

Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Kerndurchmessers d bei Siedewasserreaktoren								
Name	ν	$\frac{N_\nu}{[\text{MWe}]}$	$\frac{N_\nu \cdot L_\nu}{n_\nu \cdot h_\nu \cdot \eta_\nu} \frac{1}{[\text{m}^2]}$	$x_\nu = \lg \frac{L_\nu}{[\text{m}^2]}$	x_ν^2	$\frac{d_\nu}{[\text{m}]}$	$y_\nu = \lg \frac{d_\nu}{[\text{m}]}$	$x_\nu \cdot y_\nu$
VALLECITOS	1	10	1,0310	0,01326	0,000175	1,24	0,09342	0,001238
KAHL	2	15	1,5856	0,20030	0,040120	1,58	0,19866	0,039791
ELK RIVER	3	17,5	1,6318	0,21272	0,045249	1,45	0,16137	0,034326
BIG ROCK POINT	4	50	2,0830	0,31869	0,101563	1,87	0,27184	0,086632
DRESDEN	5	200	8,2670	0,91735	0,841531	3,27	0,51508	0,472508
K R B	6	237	5,9287	0,77298	0,597498	2,90	0,46240	0,357425
GE-STUDIE	7	500	12,1853	1,08600	1,179396	4,20	0,62366	0,677294
OYSTER CREEK	8	515	12,2225	1,08707	1,181721	4,18	0,62159	0,675711
GE-STUDIE	9	635	15,8278	1,19948	1,438752	4,72	0,67431	0,808821
GE-STUDIE	10	1000	24,2368	1,38453	1,916923	5,79	0,76268	1,055953
$\sum_{\nu=1}^n$				0,74497	0,187107		0,72529	0,161987
$\sum_{\nu=1}^n$				6,44741	7,155821		3,65972	4,047712
$\sum_{\nu=1}^n$				7,19238	7,342928		4,38501	4,209699









$$\begin{aligned} \frac{d}{[m]} &= 1,226 \left(\frac{N}{n \cdot h \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{[m^2]} \right)^{0,49} && 3.3.111.4 \\ &===== \\ &= 1,226 \left(\frac{L}{[m^2]} \right)^{0,49} \\ &===== \end{aligned}$$

Teilt man die Leistungsbereiche in einen unteren und einen oberen Bereich auf, dann ergibt sich für den unteren Bereich

$$10 \text{ MWe} \leq N \leq 50 \text{ MWe}$$

bzw. $1 \text{ m}^2 < L < 3 \text{ m}^2$

als Näherungsgleichung für den Kerndurchmesser aus der Ausgleichsrechnung mit

$$\Delta = 0,19345$$

$$\Delta_m = 0,10763$$

$$\Delta_c = 0,01503$$

$$m = \frac{\Delta_m}{\Delta} = 0,5563 \approx 0,56$$

$$c = \frac{\Delta_c}{\Delta} = 0,07770 = \lg c$$

$$c = 1,196$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{[m]} &= 1,196 \left(\frac{N}{n \cdot h \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{[m^2]} \right)^{0,56} && 3.3.111.5 \\ &= 1,196 \left(\frac{L}{[m^2]} \right)^{0,56} \\ &===== \end{aligned}$$

und für den Bereich

$$200 \text{ MWe} \leq N \leq 1000 \text{ MWe}$$

bzw. $8 \text{ m}^2 < L < 25 \text{ m}^2$

mit den Werten:

$$\begin{aligned}\Delta &= 1,3658 \\ \Delta_m &= 0,6906 \\ \Delta_c &= 0,09104\end{aligned}$$

$$m = \frac{\Delta_m}{\Delta} = 0,5055 \approx 0,51$$

$$c = \frac{\Delta_c}{\Delta} = 0,06665 = \lg c$$

$$c = 1,1659 \approx 1,166$$

aus der Ausgleichsrechnung als Beziehung für den Kerndurchmesser

$$\begin{aligned}\frac{d}{[m]} &= 1,166 \left(\frac{N}{n.h.\gamma} \cdot \frac{1}{[m^2]} \right)^{0,51} \\ &= 1,166 \left(\frac{L}{[m^2]} \right)^{0,51} \quad 3.3.111.6\end{aligned}$$

Die Ermittlung der freien Konstanten in der Gleichung für den Kerndurchmesser von Druckwassereaktoren erfolgt nach den in Abb. 3.3.111.4 dargestellten Daten verschiedener Druckwasserreaktoren.

(Werte für die Ausgleichsrechnung bei Druckwasserreaktoren siehe Tabelle Seite 104)

Die Ausgleichsrechnung ergibt für den Bereich

$$3 \text{ MWe} < N \leq 500 \text{ MWe}$$

bzw. $0,4 \text{ m}^2 < L < 8 \text{ m}^2$

$$\begin{aligned}\Delta &= 10,3464 \\ \Delta_m &= 5,2491 \\ \Delta_c &= 0,54853\end{aligned}$$

$$m = \frac{\Delta_m}{\Delta} = 0,5073 \approx 0,51$$

Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Kerndurchmessers d bei Druckwasserreaktoren

Name	ν	$\frac{N_\nu}{[\text{MWe}]}$	$\frac{N_\nu}{n_\nu \cdot h_\nu \cdot \gamma_\nu} = \frac{L_\nu}{[\text{m}^2]}$	$x_\nu = \lg \frac{L_\nu}{[\text{m}^2]}$	x_ν^2	$\frac{d_\nu}{[\text{m}]}$	$y_\nu = \lg \frac{d_\nu}{[\text{m}]}$	$x_\nu \cdot y_\nu$
SAXTON	1	3,25	0,4038	-0,39383	0,155102	0,7112	-0,14801	0,058290
BR - 3	2	10,5	0,5697	-0,24435	0,059706	0,854	-0,06854	0,016747
SHIPPINGPORT II	3	136	3,2956	0,51799	0,268313	2,118	0,32593	0,168828
YANKEE	4	141	2,8798	0,45939	0,211039	1,905	0,27989	0,128578
INDIAN POINT	5	151	3,0780	0,48827	0,238407	1,974	0,29535	0,144210
VORONEZH	6	196	7,0341	0,84720	0,717747	3,000	0,47712	0,404216
SIEMENS STUDIE	7	500	7,3444	0,86593	0,749834	3,150	0,49831	0,431501
$\sum_{\nu=1}^7$				2,54060	2,400148		1,66005	1,352370

$$c = \frac{\Delta c}{\Delta} = 0,05301 = \lg c$$

$$c = 1,13$$

$$\frac{d}{[m]} = 1,13 \left(\frac{N}{n.h.\gamma} \cdot \frac{1}{[m^2]} \right)^{0,51}$$

$$= 1,13 \left(\frac{L}{[m^2]} \right)^{0,51}$$

3.3.111.7

=====

Der niedrige Wert der Konstante c bei Druckwasserreaktoren

$$c \approx c_{\min} = 1,128$$

ist darauf zurückzuführen, daß die Angaben der Leistungsdichte sich nicht auf das wirkliche Kernvolumen, wie bei Siedewasserreaktoren, sondern in den meisten Fällen auf das Volumen des dem Kern umbeschriebenen Zylinders bezogen sind.

Die aus den Daten von Reaktorkernabmessungen mit Hilfe der Ausgleichsrechnung bestimmten freien Konstanten der Gleichungen 3.3.111.4 bis 3.3.111.7 lassen mit einiger Sicherheit den Schluß zu, daß der aus theoretischen Überlegungen ermittelte Exponent

$$m = 0,5$$

der Gleichung 3.3.111.2 richtig ist. Die in den Gleichungen 3.3.111.4 bis 3.3.111.7 aufgetretenen geringfügigen Abweichungen von diesem Wert sind auf die oben erwähnten Randeffekte zurückzuführen, die sich bei der Bestimmung von zwei freien Konstanten mit Hilfe der Ausgleichsrechnung auf beide auswirken können.

Für die folgenden Überlegungen soll die Gleichung 3.3.111.2 in der Form

$$d = c \cdot L^{0,5} \qquad 3.3.111.2a$$

als richtig vorausgesetzt werden. In dieser Gleichung muß noch die Konstante c mit der Ausgleichsrechnung aus den gegebenen Daten für die einzelnen Bereiche ermittelt werden.

Die logarithmierte Gleichung 3.3.111.2a erhält folgende Form:

$$\log d_v = 0,5 \log L_v + \log c$$

$$y_v = 0,5 x_v + C$$

Nach dem Prinzip des kleinsten Fehlerquadrates ergibt sich daraus für C:

$$C = \frac{\sum_{v=1}^n y_v - 0,5 \sum_{v=1}^n x_v}{n} = \log c$$

Aus den Tabellen für Siede- bzw. Druckwasserreaktoren auf Seite 97 bzw. Seite 104 ergibt sich damit für Siedewasserreaktoren:

im Bereich $10 \text{ MWe} \leq N \leq 50 \text{ MWe}$

bzw. $1 \text{ m}^2 < L < 3 \text{ m}^2$

$$\underset{===}{c} = 1,2252 \approx \underset{====}{1,23}$$

und im Bereich

$200 \text{ MWe} \leq N \leq 1000 \text{ MWe}$

bzw. $8 \text{ m}^2 < L < 25 \text{ m}^2$

$$\underset{===}{c} = 1,1822 \approx \underset{====}{1,18}$$

und für Druckwasserreaktoren im Bereich

$3 \text{ MWe} < N \leq 500 \text{ MWe}$

bzw. $0,4 \text{ m}^2 < L < 8 \text{ m}^2$

$$\underset{===}{c} = 1,1368 \approx \underset{====}{1,14}$$

Der kleinstmögliche Wert von c ergibt sich aus Gleichung 3.3.111.2 für a = 1 zu

$$c_{\min} = 1,128$$

=====

Für den Durchmesser des dem Kern umbeschriebenen Kreises erhält man damit folgende Beziehung:

$$\frac{d}{[m]} = c \left(\frac{N}{[MWe]} \frac{[MW_{th}/m^3]}{n} \cdot \frac{[m]}{h} \cdot \frac{[MW_{th}/MWe]}{?} \right)^{0,5}$$

$$= c \left(\frac{L}{[m^2]} \right)^{0,5} \quad 3.3.111.2$$

=====

Mit

$$c = 1,128 \dots 1,14 \dots 1,18 \dots 1,23$$

für

$$N = 1000MW_e \dots 50MW_e$$

Wobei c mit wachsendem Kerndurchmesser d, in etwa also mit wachsender Leistung abnimmt.

Bezieht sich die Angabe der Leistungsdichte n nicht auf das wirkliche Kernvolumen*, wie das bei Druckwasserreaktoren häufig der Fall ist, so ist für die Konstante c unabhängig von der Leistungsgröße ein Wert an der unteren Grenze, c = 1,13 ... 1,14, zu wählen.

Der äquivalente Durchmesser beträgt dann

$$d_{\text{ä}} = c_1 d \quad 3.3.111.8$$

=====

wobei

$$c_1 = 0,915 \dots 0,95 \dots 1$$

für

$$N = 50 MW_e \dots 1000 MW_e \quad \text{ist.}$$

* sondern auf das Volumen des dem Kern umbeschriebenen Zylinders

Sind die Daten einer Vergleichsanlage gegeben, so gilt folgende Relativformel

$$\frac{d}{d_0} = \frac{c}{c_0} \left(\frac{n_0 \cdot h_0 \cdot \gamma_0}{n \cdot h \cdot \gamma} \cdot \frac{N}{N_0} \right)^{0,5} \quad 3.3.111.9$$

liegen beide Durchmesser ungefähr bei der gleichen Größe, dann wird

$$c \approx c_0$$

und

$$\frac{d}{d_0} = \left(\frac{n_0 \cdot h_0 \cdot \gamma_0}{n \cdot h \cdot \gamma} \cdot \frac{N}{N_0} \right)^{0,5} \quad 3.3.111.9 \text{ a}$$

Für Reaktoren mit den gleichen Kerndaten h und n sowie gleichem Wirkungsgrad γ ergibt sich, wie zu erwarten war, die einfache Gleichung

$$\frac{d}{d_0} = \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,5} \quad 3.3.111.9 \text{ b}$$

Zur Berechnung des Innendurchmessers D_i müssen nun noch Aussagen über die Größe des Zwischenraumes R gemacht werden. Der Zwischenraum zwischen Kernaußen- und Druckgefäßinnendurchmesser erfüllt drei Aufgaben anhand derer man seine Abmessung bestimmen kann. Er dient als:

- a) Reflektor zur Verbesserung der Neutronenökonomie des Reaktors
- b) Abschirmung zur Verminderung der Strahlenbelastung der Druckgefäßwand
- c) Rückströmraum für das gesamte Kühlmittel oder eines Teiles desselben zur Kühlung der Druckgefäßwand.

Der Punkt a) hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Bemessung des Zwischenraumes, da schon weniger als 10 cm als Reflektorschicht genügen, und eine Vergrößerung der Reflektordicke über das notwendige Maß hinaus kaum noch einen Gewinn bringt.

Für die Bemessung des Zwischenraumes sind also die Punkte b) und c) maßgebend. Die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmittels im Kern verhält sich zu der des Kühlmittels in dem den Kern umgebenden Ringraum umgekehrt wie die entsprechenden Querschnitte, wenn man ungefähr gleiche Dichten annimmt.

$$\frac{W_K}{W_R} = \frac{F_R}{F_{K,f}}$$

Es bedeuten:

W_K = mittlere Kühlmittelgeschwindigkeit im Kern

W_R = mittlere Kühlmittelgeschwindigkeit im Ringraum

$F_R = (d + R) \pi \cdot R = (\pi d + \pi R^2) \cdot \pi$
= Ringraumquerschnittsfläche

$F_{K,f} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot v$
= freie Kernquerschnittsfläche

mit

d = Kerndurchmesser

R = Breite des Zwischenraumes (Ringraum)

$v = \frac{F_{K,f}}{F_K} = \frac{\text{freier Kernquerschnitt}}{\text{gesamter Kernquerschnitt}} < 1$

= Verengungsbeiwert

damit ergibt sich

$$\frac{F_R}{F_{K,f}} = \frac{4}{v} \left[\frac{R}{d} + \left(\frac{R}{d} \right)^2 \right] = \frac{W_K}{W_R} \quad 3.3.111.10$$

Daraus erhält man:

$$\frac{R}{d} = 0,5 \left(+ \sqrt{1 + \frac{W_K}{W_R} v} - 1 \right)$$

für

$$\frac{W_K}{W_R} \cdot v < 1 \quad \text{gilt}$$

$$\frac{R}{d} \approx 0,25 \frac{W_K}{W_R} v - 0,0625 \left(\frac{W_K}{W_R} \cdot v \right)^2 \quad 3.3.111.11$$

Über den genauen Wert der Größe $\frac{W_K}{W_R} v$ lassen sich keine allgemeingültigen Angaben machen. Zur Abschätzung der Größenordnung des Zwischenraumes R sei $w_K = w_R$ und

$$\frac{W_K}{W_R} v = 1 \cdot 0,6 = 0,6$$

angenommen. Dann ergibt die Gleichung 3.3.111.11

$$\frac{R}{d} \approx 0,13$$

d.h. die Breite des Ringraumes beträgt bei dieser Annahme ca 13% des Kerndurchmessers.

Eine Untersuchung der Ringraumbreite bei ausgeführten bzw. geplanten Reaktoren ergibt folgende Ergebnisse:

(Siehe Tabelle Seite 111) Siedewasserreaktor

Als Mittelwerte erhält man daraus für

$$10 \text{ MWe} \leq N \leq 50 \text{ MWe}$$

$$2 R = \frac{\sum_{v=1}^j 2 \cdot R_v}{n} = \frac{2,57}{3} = 0,856 \approx 0,86 \text{ m}$$

=== =====

und für

$$200 \text{ MWe} \leq N \leq 1000 \text{ MWe}$$

$$2 R = \frac{\sum_{v=1}^{j_0} 2 \cdot R_v}{n} = \frac{6,79}{7} = 0,97 \text{ m}$$

=== =====

(Siehe Tabelle Seite 112) Druckwasserreaktor

Als Mittelwert für die Breite des Zwischenraumes ergibt sich daraus

Tab. 3.3.111.3

Innendurchmesser und Breite des Ringraumes bei Siedewasserreaktoren

ν	$\frac{N_\nu}{[MWe]}$	$\frac{d_\nu}{[m]}$	$\frac{D_{i,\nu}}{[m]}$	$\frac{2R_\nu = D_{i,\nu} - d_\nu}{[m]}$	$\frac{D_{i,\nu}^*}{[m]}$	Fehler	
						[m]	[%]
1	10	1,24	2,13	0,89	2,11	- 0,02	- 0,95
2	15	1,58	2,44	0,86	2,41	- 0,03	- 1,2
3	50	1,87	2,69	0,82	2,64	- 0,05	- 1,9
4	210	2,72	3,56	0,84	3,67	+0,11	+ 3,0
5	237	2,90	3,71	0,81	3,84	+ 0,13	+ 3,5
6	420	3,78	4,88	1,10	4,78	- 0,10	- 2,1
7	500	4,20	4,88	0,68	5,09	+ 0,21	+ 4,1
8	515	4,18	5,41	1,23	5,10	- 0,31	+ 6,1
9	635	4,72	5,99	1,27	5,66	- 0,33	- 5,8
10	1000	5,79	6,65	0,86	6,78	+ 0,13	+ 1,9
			$\sum_{\nu=1}^3 2R_\nu$	2,57		- 0,26	
			$\sum_{\nu=4}^{10} 2R_\nu$	6,79			

*) nach Gleichung 3.3.111.12 berechnet

Tab. 3.3.111.4

Innendurchmesser und Breite des Ringraumes bei Druckwasserreaktoren

ν	$\frac{N_{\nu}}{[MWe]}$	$\frac{i_{\nu}}{[m]}$	$\frac{D_{i,\nu}}{[m]}$	$\frac{2R_{\nu} = D_{i,\nu} - d_{\nu}}{[m]}$	$\frac{D_{i,\nu}}{[m]}^*$	Fehler	
						[m]	[%]
1	3,25	0,71	1,47	0,76	1,45	- 0,02	- 1,4
2	10,5	0,85	1,47	0,62	1,59	+ 0,12	+ 7,5
3	60	2,07	2,74	0,67	2,87	+ 0,13	+ 4,5
4	136	2,12	2,74	0,62	2,80	+ 0,06	+ 2,1
5	141	1,91	2,77	0,86	2,66	- 0,11	- 4,1
6	151	1,97	2,97	1,00	2,73	- 0,24	- 8,8
7	196	3,00	3,60	0,60	3,75	+ 0,15	+ 4,0
8	500	3,15	3,82	0,67	3,82	0	0
			$\sum_{\nu=1}^8 2R_{\nu}$	5,80		+ 0,09	

*) nach Gleichung 3.3.111.12 berechnet

$$2 R = \frac{\sum_{v=1}^f 2 \cdot R_v}{n} = \frac{5,80}{8} = 0,725 \approx 0,73$$

====

für den Bereich

$$3 \text{ MWe} \leq N \leq 500 \text{ MWe}$$

Aus den Zusammenstellungen der ausgeführten Ringraumbreiten R in den Tab. 3.3.111.3 und Tab. 3.3.111.4 ist zu ersehen, daß für Reaktoren kleiner Leistung, d.h. kleinen Kerndurchmessers, auch/strömungstechnische Überlegungen bei der Bemessung des Zwischenraumes keine Rolle spielen. Bei Reaktoren kleiner Leistung ist allein die Strahlungsbelastung der Druckgefäßwandung maßgebend. Der Zwischenraum wird so ausgelegt, daß die Bestrahlungsdosis durch schnelle Neutronen mit $E > 1 \text{ MeV}$ die heute als zulässig angesehene Grenze von 10^{19} nvt während der ganzen Lebensdauer nicht überschreitet.

Strömungstechnische Gesichtspunkte kommen anscheinend erst bei Leistungen $N > 500 \text{ MWe}$ ins Spiel, doch ist eine einheitliche Tendenz nicht festzustellen. (siehe Tab. 3.3.111.3 $2 R = 1,27 \text{ m}$ bei $N = 635 \text{ MWe}$ und $2 R = 0,86$ bei $N = 1000 \text{ MWe}$ und gleichem Reaktortyp).

Ob diese Schwankungen auf eine absichtlich unterschiedliche Wahl der Rückströmgeschwindigkeiten oder aber auf Vorleistungen für den Einbau eines größeren Kerns zurückzuführen sind, kann nicht mit Sicherheit geklärt werden. Da hier jedoch keine genaue Berechnung der Druckgefäßabmessungen erfolgen soll, sondern lediglich eine möglichst genaue Abschätzung erforderlich ist, werden die oben berechneten Mittelwerte bei der Berechnung des Druckgefäß-Innendurchmessers als Zuschlag verwendet.

Für den Innendurchmesser des Reaktordruckgefäßes erhält man aus Gleichung 3.3.111.1 unter Berücksichtigung der Gleichung 3.3.111.2

$$D_i = c \cdot \left(\frac{N_e}{h \cdot n \cdot \gamma} \right)^{0,5} + 2 R$$

$$\frac{D_i}{[m]} = c \cdot \left(\frac{L}{[m^2]} \right)^{0,5} + \frac{2R}{[m]} \quad 3.3.111.12$$

Darin haben die Größen c und R folgende Werte:

Für Siedewasserreaktoren

im Bereich: 10 MWe ≤ N ≤ 50 MWe

$$c = 1,23$$

=====

$$2 R = 0,86 \text{ m}$$

=====

im Bereich: 200 MWe ≤ N ≤ 1000 MWe

$$c = 1,18$$

=====

$$2 R = 0,97 \text{ m}$$

=====

Für Druckwasserreaktoren im Bereich

3 MWe ≤ N ≤ 500 MWe

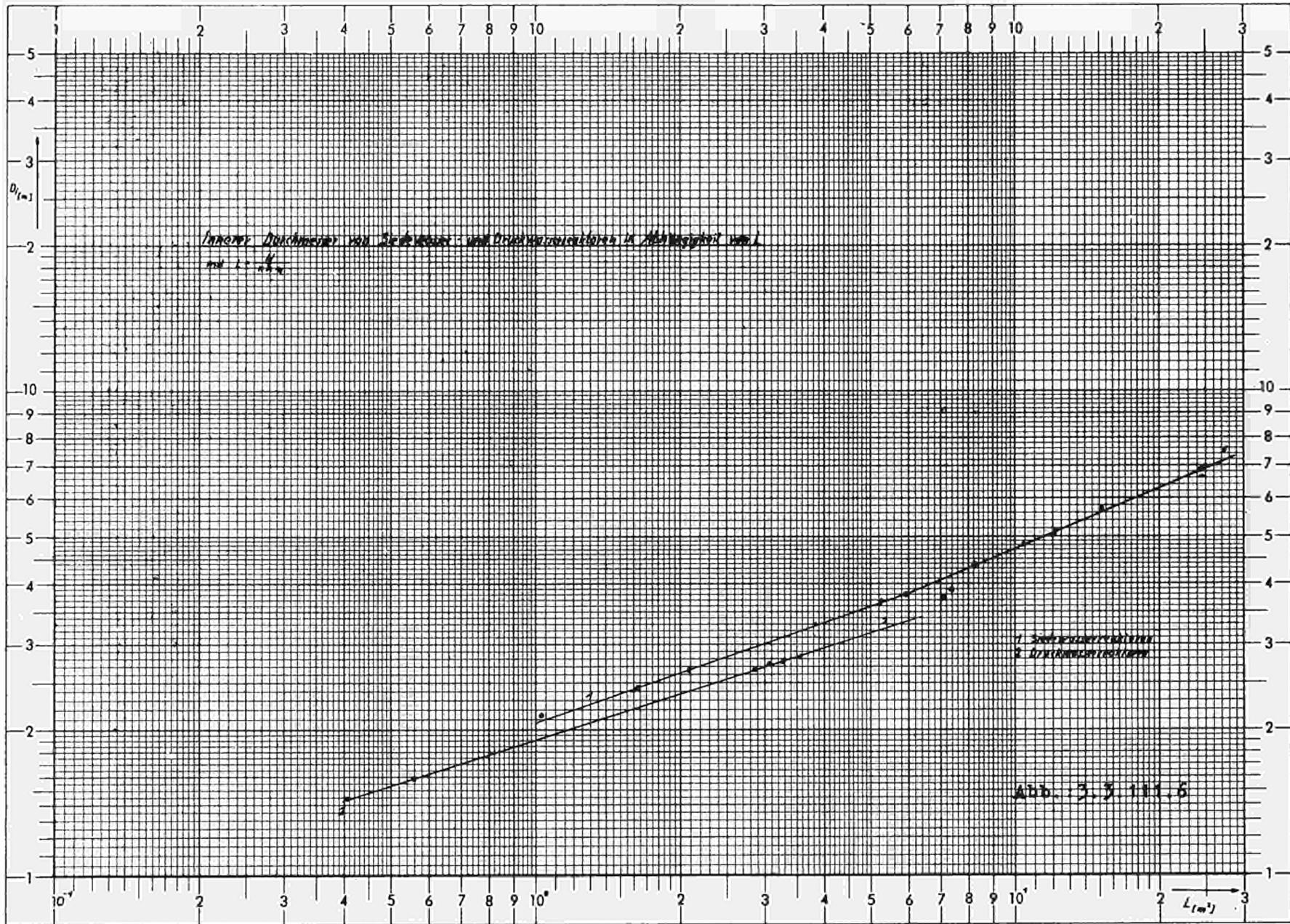
$$c = 1,14$$

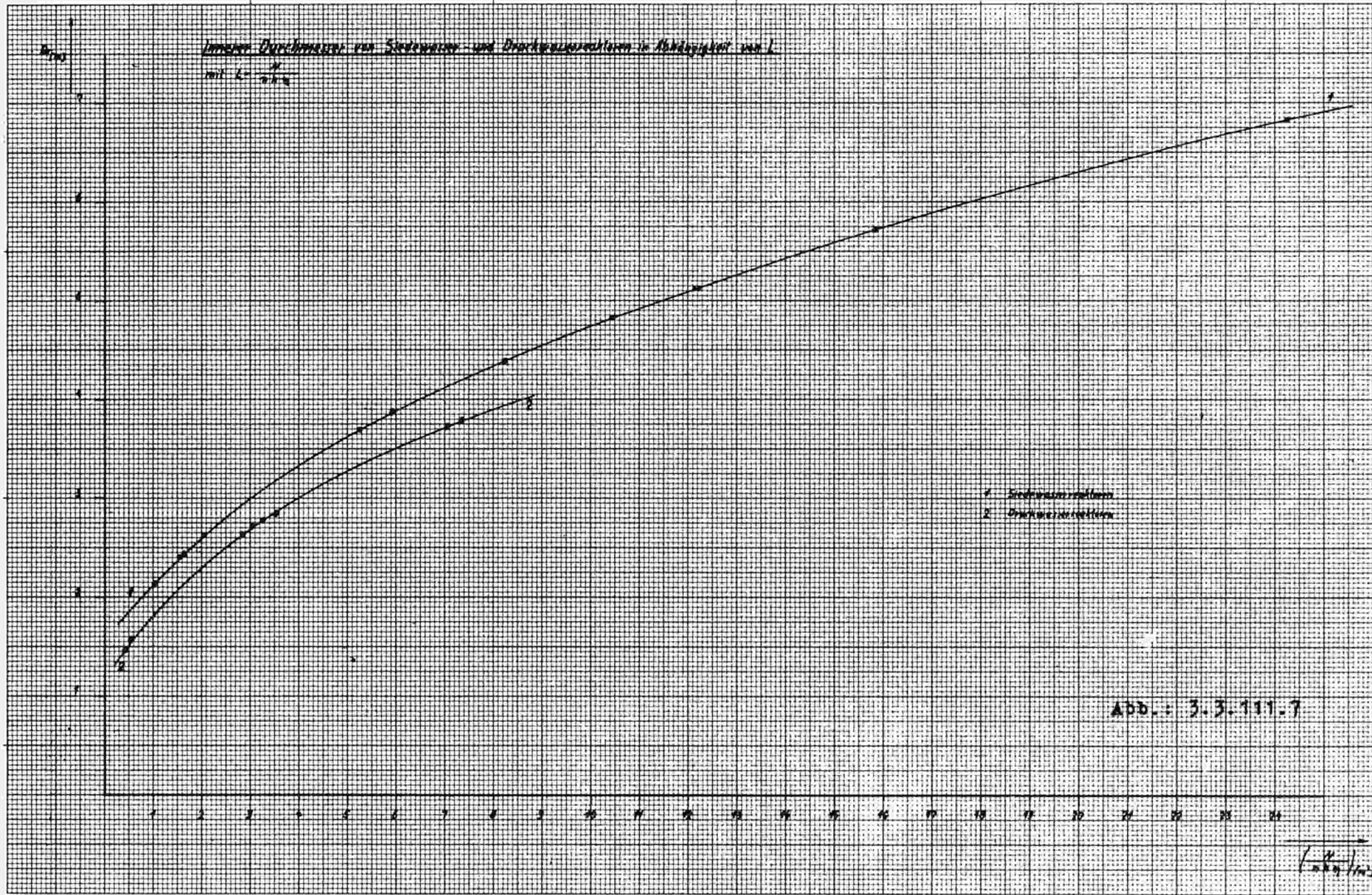
=====

$$2 R = 0,73 \text{ m}$$

=====

Die Angaben für Druckwasserreaktoren sind nur bis $N = 500 \text{ MW}_e$ durch Beispiele belegt. Für die innerhalb dieser Studie notwendigen Rechnungen soll jedoch die Gültigkeit der in diesem Bereich ermittelten Werte auch für $N > 500 \text{ MW}_e$ vorausgesetzt werden.





3.3.1.1.2. Die Höhe des Reaktordruckgefäßes von Siedewasserreaktoren als Funktion der Leistung und des Innendurchmessers

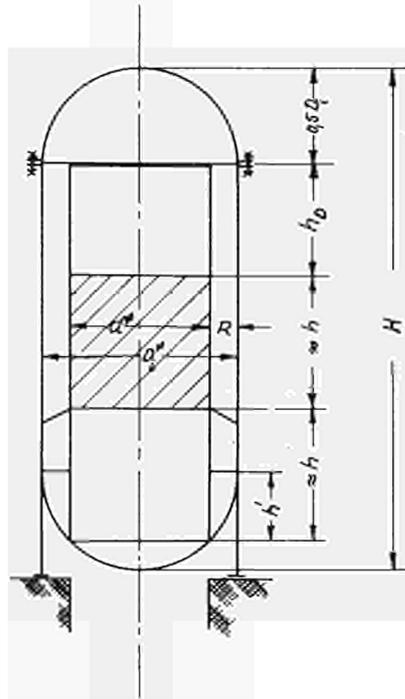


Abb. 3.3.112.1

Die erforderliche Höhe des Reaktordruckgefäßes von Siedewasserreaktoren mit interner Dampfabscheidung wird bei festliegendem Kerndurchmesser durch die Kernhöhe und den Platzbedarf der notwendigen Einbauten bestimmt. Im folgenden soll angenommen werden, daß sich das Druckgefäß aus einem zylindrischen Teil und zwei Halbkugelböden zusammensetzt.

Der Platzbedarf des Kernes und der Regelstäbe wird ungefähr gleich der doppelten Kernhöhe sein, wobei die Kernhöhe größer als die aktive Länge der Brennelemente ist. Für die folgende Abschätzung der Druckgefäßhöhe soll jedoch angenommen werden, daß der Platzbedarf für Kern und Regelstäbe

$$\approx 2 h \quad \text{ist,}$$

wobei h = aktive Länge der Brennelemente ist.

Bei den modernen Siedewasserreaktor-Konstruktionen erfolgt die Dampfabscheidung und -trocknung innerhalb des Druckgefäßes. Das hierfür benötigte Volumen ist abhängig von der Dampfleistung des Reaktors, die wiederum, bei gleichen Dampfzuständen, der Kraftwerksleistung proportional ist. Bei gegebenem Druckgefäßinnendurchmesser und bekannter, zulässiger Dampftraumbelastung läßt sich die benötigte Höhe des Dampfabscheideraumes h_D aus der Kraftwerksleistung näherungsweise ermitteln.

Die Druckgefäßhöhe setzt sich aus den von den Einbauten beanspruchten Längen und den rein konstruktiv bedingten Höhen der Halbkugelböden zusammen. Bei den z.Z. üblichen Konstruktionen enthält der Deckel des Reaktordruckgefäßes keine Einbauten, während die Steuerstabführungsrohre soweit wie möglich in den unteren Halbkugelboden hineingezogen sind (siehe Abb. 3.3.112.1). Für die Berechnung der Druckgefäßhöhe ist die Höhe des halbkugelförmigen Deckels voll in Rechnung zu stellen, während beim Druckgefäßboden nur noch die Höhe der Restkalotte berücksichtigt werden muß. Mit den Bezeichnungen der Abb. 3.3.112.1 ergibt sich dann für die Druckgefäßhöhe

$$H = h_D + 2h + D_i - h' \quad 3.3.112.1$$

Darin bedeuten

H = Reaktordruckgefäßhöhe

h_D = Höhe des von der Dampfabscheide- und -trockeneinrichtung benötigten Raumes

h = aktive Kernhöhe

$2h$ = die ungefähr vom Kern und der Regelstabeinrichtung beanspruchte Höhe

D_i = Innendurchmesser des Reaktordruckgefäßes

h' = die von den Einbauten (Steuerstabführungsrohren) innerhalb des Halbkugelbodens ausgenutzte Länge (siehe Abb. 3.3.112.1)

Die Größe h kann den Angaben über die Kernabmessungen entnommen werden, die Größe D_i aus der Kraftwerksnennleistung berechnet werden. Die restlichen Größen der Gleichung 3.3.112.1 müssen noch durch bekannte Größen ausgedrückt werden.

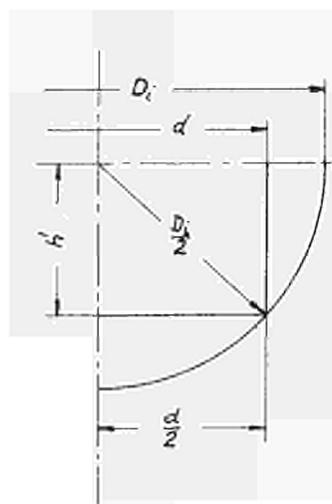


Abb. 3.3.112.2

Nimmt man an, daß die von den Steuerstabsführungsrohren eingenommene Querschnittsfläche nicht wesentlich von der durch den Kern eingenommenen Querschnittsfläche mit dem Durchmesser d abweicht, dann ergibt sich der Betrag h' , um den die Steuerstabsführungsrohre in den Halbkugelboden hineingezogen werden können nach Abb. 3.3.112.2

$$h' = \sqrt{\left(\frac{D_i}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

$$h' = \frac{D_i}{2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D_i}\right)^2} \quad 3.3.112.2$$

Der Wurzelausdruck in Gleichung 3.3.112.2 wird sich mit den Größen d und D_i ändern. Für eine Abschätzung der Druckgefäßhöhe bei gegebener Kraftwerksleistung genügt jedoch ein geeigneter Mittelwert dieses Ausdruckes.

(Siehe Tabelle Seite 120)

Als Mittelwert ergibt sich:

$$\left(\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D_i}\right)^2}\right)_m = 0,597 \approx 0,6$$

Damit wird

$$h' \approx 0,6 D_i \quad 3.3.112.3$$

Für eine genauere Rechnung ergibt sich durch eine Approximation im logarithmischen Netz:

Tab. 3.3.112.1

$\frac{N}{[\text{MWe}]}$	$\frac{d^*}{[\text{m}]}$	$\frac{D_i^*}{[\text{m}]}$	$1 - \left(\frac{d}{D_i}\right)^2$	$\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D_i}\right)^2}$
160	2,62	3,59	0,4674	0,6837
237	2,87	3,84	0,4416	0,6645
500	4,12	5,09	0,3449	0,5873
570	4,43	5,40	0,3272	0,5720
635	4,69	5,66	0,3135	0,5599
1000	5,81	6,78	0,2658	0,5156
			Summe	3,5830

* Berechnet aus den Gleichungen 3.3.111.2 und 3.3.111.12

$$h' = 0,6 \cdot D_i^{0,56} \quad 3.3.112.4$$

=====

Zur Berechnung des Raumbedarfes der Dampfabscheideeinrichtung wird eine mittlere Leistungsdichte n_D des Dampfraumes ermittelt, aus der sich die Höhe des von der Dampfabscheideeinrichtung benötigten Raumes wie folgt berechnet

$$n_{D,th} = \frac{N_{th}}{V_D} = \text{Leistungsdichte im Dampfabscheider}$$

$$V_D = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot h_D$$

daraus ergibt sich

$$h_D = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{N_{el}}{\eta \cdot n_{D,th} \cdot D_i^2} = 1,2732 \cdot \frac{N_{el}}{\eta \cdot n_{D,th} \cdot D_i^2} \quad 3.3.112.5$$

mit $n_{D,netto} = \frac{N_{el,netto}}{V_D} = \eta \cdot \frac{N_{th}}{V_D} = \eta \cdot n_{D,th}$ ergibt sich

$$h_D = 1,2732 \cdot \frac{N_{el}}{n_{D,netto} \cdot D_i^2} \quad 3.3.112.5a$$

Aus den Daten ausgeführter Reaktoren erhält man folgende Mittelwerte (siehe Tabelle 3.3.112.2):

$$n_{D,netto} = \left(\frac{N_{el}}{V_D} \right)_m = \frac{6}{1,7766} = 3,3772$$

als Leistungsdichte im Dampfraum bezogen auf elektrische Nettoleistung.

$$n_{D,th} = \left(\frac{N_{th}}{V_D} \right)_m = \frac{66,7341}{6} = 11,1223$$

als Leistungsdichte im Dampfraum bezogen auf die thermische Leistung.

Mit diesen Mittelwerten ergibt sich für h_D

$$h_D = 0,377 \cdot \frac{N_{el}}{D_i^2} \quad 3.3.112.6$$

$\frac{N_{el}}{[MWe]}$	$\frac{N_{th}}{[MWth]}$	$\frac{D_i}{[m]}$	$\frac{h}{[m]}$	$\frac{h'}{[m]}$	$\frac{H}{[m]}$	$\frac{h_o}{[m]}$	$\frac{V_D}{[m^3]}$	$\frac{1}{n_{D,netto}} = \frac{V_D}{N_{el}}$	$n_{D,th} = \frac{N_{th}}{V_D}$
160	520	3,90	3,10	1,23	17,30	4,73	48,19	0,3011	10,7906
237	801	4,71	3,46	1,10	16,45	6,58	71,10	0,2999	11,2661
500	1600	4,83	"	1,24	17,50	6,54	122,37	0,2447	13,0753
570	1830	5,55	"	1,06	19,50	8,30	200,67	0,3520	9,3185
635	2013	5,99	"	1,84	18,70	7,23	203,86	0,3210	9,8991
1000	3194	6,65	"	1,64	19,76	7,43	257,90	0,2579	12,3845
								1,7766	66,7341

Tab.: 3.3.112.2

bzw.

$$h_D = 0,114 \frac{N_{el}}{\gamma \cdot D_i^2} \quad 3.3.112.7$$

Für die Höhe des Reaktordruckgefäßes ergeben sich aus Gleichung 3.3.112.1 unter Verwendung der Gleichungen 3.3.112.3 bis 7 folgende Abschätzungsformeln

$$H \approx 0,114 \frac{N_{el}}{\gamma \cdot D_i^2} + 2h + D_i^{-0,6} D_i^{0,56} \quad 3.3.112.8$$

bei auf die elektrische Nettoleistung bezogener Leistungsdichte im Dampfraum,

$$H \approx 0,377 \frac{N_{el}}{D_i^2} + 2h + D_i^{-0,6} D_i^{0,56} \quad 3.3.112.9$$

bei auf die thermische Leistung bezogener Leistungsdichte im Dampfraum.

3.3.1.1.3 Die Höhe des Reaktordruckgefäßes von Druckwasserreaktoren

Die Höhe des Reaktordruckgefäßes von Druckwasserreaktoren wird im wesentlichen von der Höhe des Kerns, der Länge der Steuerstäbe und der Größe der Kühlmittelmischräume bestimmt. Da die Dampfabscheider entfallen, ergibt sich folgende einfache Näherungsbeziehung:

$$H \approx c \cdot h + D_i \qquad 3.3.113.1$$

mit $c = 3$ bei Reaktoren mit Steuerstabfolgestäben
(ältere Konstruktionen)
 $c \approx 2,2$ bei modernen Konstruktionen

Der Halbkugelraum des Druckgefäßbodens und ein Teil des freien Raumes unterhalb des Kernes dienen als Kühlmittelverteilerkammer. Etwaige Unterschiede in der Aufwärmspanne können sich durch Mischvorgänge in dem Raum oberhalb des Kernes ausgleichen, in dem sich auch in den meisten Fällen die Steuerstabführungsrohre befinden.

Die bei älteren Druckwasserkonstruktionen üblichen Steuerstabfolgestäbe werden bei neueren Konstruktionen nicht mehr verwendet. Der Platzbedarf für Steuerstäbe und Kern beträgt bei neueren Konstruktionen ca. $2 h$. Rechnet man den Platzbedarf für die Kühlmittelverteilung noch hinzu dann ergibt sich als Höhe des zylindrischen Druckgefäßteils $H_z \approx 2,2 h$.

3.3.1.1.4 Die Wandstärke von Reaktordruckgefäßen

Nach DIN 2413 setzt sich die Wandstärke s eines zylindrischen Behälters aus der rechnerischen Wandstärke s_0 und den Zuschlägen c_i für verschiedene Einflüsse zusammen

$$s = s_0 + c_1 + c_2 \qquad 3.3.114.1$$

=====

Darin bedeutet

- s_0 = rechnerische Wandstärke [mm]
- c_1 = Zuschlag zum Ausgleich der zulässigen Wanddickenunterschreitung [mm]
- c_2 = Zuschlag für Korrosion und Abnutzung [mm]

Der Zuschlag c_2 kann bei Reaktordruckgefäßen entfallen, da es sich um plattierte bzw. durch Auftragschweißung gegen Korrosion geschützte Stähle handelt.

Für die Berechnung der Wandstärke s_0 gegen Dauerbruch bei schwellender Belastung gilt nach DIN 2413 die Beziehung

$$\frac{s_0}{[\text{mm}]} = \frac{\frac{D_i}{[\text{mm}]}}{200 \frac{k}{[\text{kp/mm}^2]} - 3 \frac{p}{[\text{kp/cm}^2]}} \quad 3.3.114.2$$

Darin ist

D_i = Innendurchmesser des Druckgefäßes

p = Betriebsdruck

$k = \frac{K \cdot \nu}{S}$ = zulässige Werkstoffbeanspruchung

K = Werkstoffkennwert (z. B. $\frac{\sigma_B}{4}$ oder $\frac{\sigma_B}{3}$)

ν = Verschwächungsbeiwert der Schweißnaht

S = Sicherheitsbeiwert

Der Zuschlag c_1 richtet sich nach der prozentual zulässigen Wanddickenunterschreitung und wird in Bruchteilen der rechnerischen Wandstärke angegeben

$$c_1 = a \cdot s_0 \quad a \ll 1$$

Damit ergibt sich aus Gleichung 3.3.114.1 und 3.3.114.2

$$s = s_0 + a s_0 = s_0 (1+a)$$

$$s_0 = \frac{s}{1+a} = \frac{D_i p}{200k - 3 p}$$

$$\frac{D_i}{S} = \frac{1}{1+a} \left(200 \frac{k}{p} - 3 \right) \quad 3.3.114.3 \text{ a}$$

$$\begin{aligned} & \text{=====} \\ & = a_1 \frac{K}{p} - a_2 \quad 3.3.114.3 \\ & \text{=====} \end{aligned}$$

Mit

$$a_1 = \frac{2 \cdot \nu}{S(1+a)} \quad 3.3.114.4$$

$$a_2 = \frac{3}{1+a} \quad 3.3.114.5$$

wenn K und p in beliebigen, aber gleichen Maßeinheiten eingesetzt werden.

Setzt man gleiche Toleranzanforderungen voraus, dann hat a für alle Druckbehälter den gleichen Wert, z.B. bei einer zulässigen Wandstärkenunterschreitung von 12% ergibt sich

$$a = 0,14$$

Nimmt man einen Sicherheitsbeiwert

$$S = 1,1$$

und einen Verschwächungsbeiwert

$$\nu = 1,0$$

an, dann erhält man für die Konstanten a₁ und a₂ folgende Werte

$$a_1 = \frac{2}{1,1 \cdot 1,14} = 1,5948 \approx 1,6$$

$$a_2 = \frac{3}{1,14} = 2,6315 \approx 2,63$$

Die Gleichung 3.3.114.3 kann damit wie folgt geschrieben werden

$$\begin{aligned} \frac{D_i}{s} & \approx 1,6 \frac{K}{p} - 2,63 \quad 3.3.114.6 \\ & \text{=====} \end{aligned}$$

Der auf diese Weise gewonnene Ansatz soll anhand von Werten aus der GE - Studie ¹⁾ für einen 1000 MWe Siedewasserreaktor nachgeprüft werden.

(Siehe Tabelle Seite 129)

Aus diesen Werten ergibt sich folgende Gleichung

$$\frac{\frac{D_i}{s} - 40,31}{\frac{K}{p} - 26,7} = \frac{61,65 - 40,31}{40 - 26,7} = 1,6045$$

$$\frac{D_i}{s} = 1,6045 \frac{K}{p} - 2,5301$$

$$\frac{D_i}{s} \approx 1,6 \frac{K}{p} - 2,53 \quad 3.3.114.7$$

=====

Das Ergebnis dieser Nachprüfung liefert eine gute Übereinstimmung mit der Gleichung 3.3.114.6. Zur weiteren Kontrolle wird das Durchmesser-zu-Wandstärkenverhältnis des Druckgefäßes des KRB -Reaktors mit der Gleichung 3.3.114.7 berechnet und mit den Daten der wirklichen Ausführung verglichen.

Für KRB gelten folgende Daten:

Werkstoffkennwert

$$K = 20072 \text{ Psi} = 14,17 \text{ kp/mm}^2$$

Betriebsdruck

$$p = 1015 \text{ Psi} = 71,3 \text{ kp/cm}^2$$

Daraus ergibt sich

$$\frac{D_i}{s} = 1,6 \cdot \frac{1417}{71,3} - 2,53 = 29,18$$

Aus den gegebenen Abmessungen erhält man folgenden Wert:

$$\frac{D_i}{s} = \frac{371}{12,7} = 29,21$$

Nach den neuen ASME - Vorschriften *) ist anstelle des bisher vorgeschriebenen Wertes

$$K = \frac{B}{4}$$

die Berechnung mit

$$K = \frac{B}{3}$$

zulässig.

Für das KRB - Druckgefäß würden sich bei einer Auslegung nach den neuen Vorschriften unter Verwendung des gleichen Werkstoffes folgende Werte ergeben

$$K = 14,13 \frac{4}{3} = 18,8 \text{ kp/mm}^2$$

$$\frac{D_i}{s} = 1,6 \frac{1880}{71,3} - 2,53 = 39,66$$

*) siehe Fußnote Seite 143

Tabelle 3.3.114.1

Material	$\frac{K}{[\text{Psi}]}$ bei 600° F	$\frac{D_i}{[\text{cm}]}$	$\frac{p}{[\text{Psi}]}$	$\frac{s}{[\text{cm}]}$
ASTM A 302 B	26700	665,48	1000	16,51
ASTM A 336	26700	"	"	16,51
2-1/4 Cv-1Mo	40000	"	"	10,80
Ni - Cv - Mo	"	"	"	"
Ni - Cv - Mo-V	"	"	"	"
S9S - 100	"	"	"	"

$\frac{D_i}{s}$



60

40

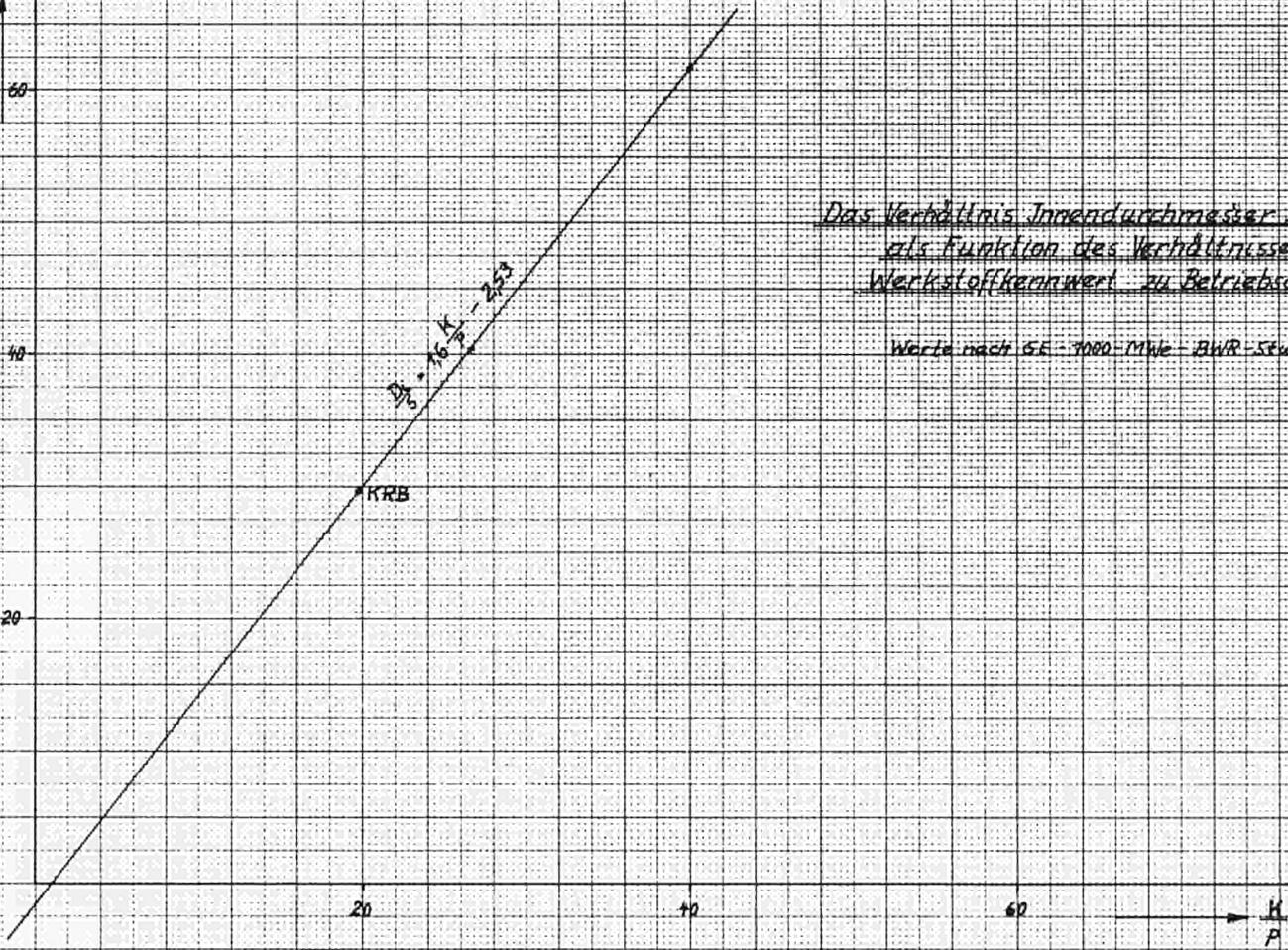
20

20

40

60

$\frac{K}{P}$



Das Verhältnis Innendurchmesser zu Wandstärke
als Funktion des Verhältnisses
Werkstoffkennwert zu Betriebsdruck

Werte nach SE-3000-MWe-BWR-Studie

Abb.: 3.3-114.1

3.3.1.1.5 Beziehungen zur Abschätzung der Reaktordruckgefäßkosten

Eine einigermaßen genaue Kalkulation der Kosten eines Reaktordruckgefäßes kann nur an Hand einer Konstruktionszeichnung eines bestimmten Druckgefäßes durchgeführt werden. Wie schwierig aber selbst dann die Ermittlung der Kosten ist, zeigen die beachtlichen Differenzen zwischen Angebotspreis und den wirklich entstandenen Kosten bei der Herstellung der ersten Reaktordruckgefäße in der Bundesrepublik.

Da eine Detailkalkulation hier nicht möglich und auch wenig sinnvoll ist, können die im folgenden angegebenen Kostenbeziehungen nur zur ungefähren Schätzung der Kosten eines Reaktordruckgefäßes verwendet werden.

Als allgemeine Form der Kostenfunktion soll folgender Ansatz versucht werden

$$K_D = k_G G + k_F F + k_N \cdot Z_N + k_S Z_S \quad 3.3.115.1$$

Die darin verwendeten Größen sind noch Funktionen verschiedener Veränderlicher. Es bedeuten:

K_D = Kosten des Druckgefäßes in DM

k_G = Kosten je Gewichtseinheit $\frac{DM}{kg}$

k_F = Kosten je Flächeneinheit $\frac{DM}{m^2}$

k_N = Kosten je Rundnaht $\frac{DM}{Naht}$

k_S = Kosten je Stutzen $\frac{DM}{Stutzen}$

G = Gewicht des Druckgefäßes in kg

F = Oberfläche des Druckgefäßes in m^2

Z_N = Zahl der Rundnähte

Z_S = Zahl der Stutzen

Im folgenden soll nun untersucht werden, von welchen Veränderlichen die einzelnen Terme der Gleichung 3.3.115.1 abhängen und, wenn möglich, soll auch der funktionale Zusammenhang angegeben werden.

Der erste Term der Gleichung 3.3.115.1 stellt den gewichtsabhängigen Teil der Kosten dar. Zu diesen gewichtsabhängigen Kosten zählen in erster Linie die Materialkosten. Nimmt man an, daß die Bearbeitungszugaben immer prozentual gleichbleiben, dann sind die Materialkosten dem Gewicht proportional. Weiter soll angenommen werden, daß die Kosten der Warmbehandlung und der spanlosen Bearbeitung mit Ausnahme der Schweißarbeiten eine Funktion des Werkstückgewichtes sind. Für die Kosten je Gewichtseinheit erhält man dann folgende Form

$$k_G = k_G (G) + \text{const.} \quad 3.3.115.2$$

Das Gewicht des Druckgefäßes wird näherungsweise proportional dem Produkt innere Oberfläche F_i mal Wandstärke s angenommen

$$G \sim F_i s$$

Für ein zylindrisches Gefäß mit Kugelböden ergibt sich für die innere Oberfläche

$$F_i = D_i^2 \pi + D_i \pi (H - D_i)$$
$$F_i = \pi D_i \cdot H$$

=====

3.3.115.3

Damit erhält man für das Gewicht des Druckgefäßes folgende Beziehung:

$$G \sim s \cdot D_i H = \frac{s}{D_i} D_i^2 H$$

=====

3.3.115.4

Der zweite Term der Gleichung 3.3.115.1 stellt die flächenabhängigen Kosten dar. Als flächenabhängig können die Kosten der spanabhebenden Bearbeitung und der Schweißplattierung angesehen werden.

Die Kosten je Flächeneinheit werden in der Form ähnlich aufgebaut sein, wie die Kosten je Gewichtseinheit

$$k_F = k_F (F) + \text{const.} \quad 3.3.115.5$$

Gleichung 3.3.115.3 gibt die Beziehung für die Druckgefäßinnenfläche an, auf die die Flächenkosten bezogen werden sollen

$$F \sim D_i \cdot H \sim \frac{G}{D_i} \cdot \frac{D_i}{s} \quad 3.3.115.6$$

====

Der dritte Term der Gleichung 3.3.115.1 berücksichtigt die Kosten der Schweißnähte, und zwar wird dabei vorausgesetzt, daß das Druckgefäß aus geschmiedeten Ringen zusammengesweißt wird. Die Kosten einer Naht werden proportional der Nahtlänge sein; außerdem hängen sie von der Kesselwandstärke ab.

$$k_N = k_N (s, D_i) \sim k_N (s) \cdot D_i \quad 3.3.115.7$$

Die Zahl der Rundnähte hängt von dem verwendeten Blockgewicht oder vom maximal möglichen Blockgewicht ab. Aus dem Blockgewicht erhält man unter Berücksichtigung der Bearbeitungs- und Prüfungszugaben das mögliche Gewicht eines Zylinderschlusses bzw. eines Bodens G_s . Aus dem Gesamtgewicht des Druckgefäßes und dem Gewicht je Schuß läßt sich die ungefähre Zahl der Rundnähte ermitteln

$$Z_N \approx \frac{G}{G_s} \quad 3.3.115.8$$

Nach Angaben der Industrie betragen die Blockgewichte 150, 180 und maximal 220 to. Das Fertigungsgewicht eines Schweißdetails beträgt nach den gleichen Angaben etwa 50 % des Blockgewichtes.

Mit dem letzten Term der Gleichung 3.3.115.1 werden die Kosten für die verschiedenen Anschlußstutzen am Druckgefäß berücksichtigt. Die Kosten je Stutzen sind abhängig von dem Stutzendurchmesser und der Wandstärke des Reaktor-druckgefäßes

$$k_s = k_s (s, D_s) \quad 3.3.115.9$$

Die Zahl der Steuerstabstützen, sowie die der Stützen der In-core-Instrumentierung sind etwa dem Druckgefäßquerschnitt proportional.

$$Z_{s_1} \sim D_i^2 \sim \frac{G}{H} \frac{D_i}{s} \quad 3.3.115.10$$

Die Zahl der Stützen für die Umwälzkreisläufe, Dampfentnahme usw. wird etwa dem Umfang des Reaktordruckgefäßes proportional sein

$$Z_{s_2} \sim D_i \sim \frac{G}{D_i H} \frac{D_i}{s} \quad 3.3.115.11$$

Führt man die Beziehungen 3.3.115.9 11 in die Gleichung 3.3.115.1 ein, dann erhält man

$$K_D = \left[c_1 k_G + c_2 \frac{k_F}{D_i} \frac{D_i}{s} + c_3 \frac{k_N(s)}{G_s} D_i + c_4 \frac{k_{s_1}}{H} \frac{D_i}{s} + c_5 \frac{k_{s_2}}{D_i H} \frac{D_i}{s} \right] \frac{s}{D_i} D_i^2 H$$

$$= \left[c_1 k_G + c_3 \frac{k_N(s)}{G_s} D_i + \left(c_2 \frac{k_F}{D_i} + c_4 \frac{k_{s_1}}{H} + c_5 \frac{k_{s_2}}{D_i H} \right) \frac{D_i}{s} \right] \frac{s}{D_i} D_i^2 H$$

=====

3.3.115.12

Mit Hilfe der Gleichung 3.3.115.12 ließen sich die Druckgefäßkosten verhältnismäßig genau ermitteln, wenn es möglich wäre, die unbekanntenen Größen in den eckigen Klammern anzugeben. Mit dem zur Zeit vorliegenden Datenmaterial ist das jedoch unmöglich. Aus diesem Grunde soll eine einfachere Schätzformel eingeführt werden. Dazu wird angenommen, daß die Kosten des Reaktordruckgefäßes etwa proportional zum Gewicht sind.

$$K_D \sim G \sim \frac{s}{D_i} D_i^2 H$$

$$K_D \approx c \frac{s}{D_i} D_i^2 H \quad 3.3.115.13$$

=====

Mit folgender Abkürzung

$$L_1 = \frac{s}{D_i} D_i^2 H \quad 3.3.115.14$$

nimmt Gleichung 3.3.115.13 die Form

$$K_D \approx c \cdot L_1 \quad 3.3.115.13a$$

=====

an. Aus den vorhandenen Daten ergibt sich für:

1) Siedewasserreaktor-Druckgefäße

$$\begin{aligned} \frac{K_D}{[DM]} &\approx 0,675 \cdot 10^6 \frac{s}{D_i} \frac{D_i^2}{[m^2]} \frac{H}{[m]} \\ &\approx 0,675 \cdot 10^6 \frac{L_1}{[m^3]} \end{aligned} \quad 3.3.115.15$$

für $L_1 < 5,5 \text{ m}^3$.

2) Druckwasserreaktor-Druckgefäße

$$\begin{aligned} \frac{K_D}{[DM]} &\approx 0,87 \cdot 10^6 \frac{s}{D_i} \frac{D_i^2}{[m^3]} \frac{H}{[m]} \\ &\approx 0,87 \cdot 10^6 \frac{L_1}{[m^3]} \end{aligned} \quad 3.3.115.16$$

für $L_1 < 8,5 \text{ m}^3$

Diese einfachen Beziehungen stellen erste Näherungen dar, die nicht allen Anforderungen genügen können. Für überschlägige Kostenermittlungen sind sie jedoch ausreichend.

Überschreiten die Druckgefäßabmessungen oder -gewichte bestimmte Maximalwerte, so daß ein Transport nicht mehr möglich ist, dann muß zur Baustellenfertigung übergegangen werden. Die Grenzen sind durch das Bahnprofil - 4,50 m lichte Weite - und die Tragfähigkeit der verwendeten Transportmittel festgelegt.

Durch die Baustellenfertigung verteuert sich die Herstellung des Druckgefäßes um ca. 20 ... 25%. Für die Herstellungskosten ergibt sich bei einer Vertauierung p

$$K_D = c (1 + p) L_1$$

3.3.115.17

Nimmt man einen Kostenzuwachs von 20% beim Übergang von der Werkstatt- zur Baustellenfertigung an, dann ergibt sich für

1) Siedewasserreaktor-Druckgefäße

$$\begin{aligned} \frac{K_D}{[\text{DM}]} &\approx 0,675 \cdot (1 + 0,2) \cdot 10^6 \frac{L_1}{[\text{m}^3]} \\ &\approx 0,813 \cdot 10^6 \frac{L_1}{[\text{m}^3]} \end{aligned} \quad 3.3.115.18$$

für $L_1 > 5,5 \text{ m}^3$

2) Druckwasserreaktor-Druckgefäße

$$\begin{aligned} \frac{K_D}{[\text{DM}]} &\approx 0,87 \cdot (1 + 0,2) \cdot 10^6 \frac{L_1}{[\text{m}^3]} \\ &\approx 1,04 \cdot 10^6 \frac{L_1}{[\text{m}^3]} \end{aligned} \quad 3.3.115.19$$

für $L_1 > 8,5 \text{ m}^3$.

Der Übergang von der Werkstatt- zur Baustellenfertigung wird bei der heutigen Bauweise der Reaktoren für Siedewasserreaktoren etwa zwischen 200 MW_e und 300 MW_e notwendig. Dem entspricht ein Wert der Einflußgröße L_1 von ungefähr $5,5 \text{ m}^3$.

Bei Druckwasserreaktoren erfolgt der Übergang zwischen 500 MW_e und 600 MW_e , bei einer Einflußgröße von schätzungsweise $8,5 \text{ m}^3$.

Angaben über Transport- und Montagekosten finden sich im Abschnitt 3.3.1.1.7 .

Abb.: 3.3.115.1

Kosten K_D
↑
35 10^6 DM
30
25
20
15
10
5
0

Anlagekosten des Reaktor-Druckgefäßes

$$L_1 = \frac{\pi}{4} D_i^2 H = \text{Einflußgröße}$$

PWR

BWR

Einflußgröße L_1
→

25 m^3 30

3.3.1.1.6 Zusammenhang zwischen der Einflußgröße L_1 und dem

Gewicht des Reaktordruckgefäßes

In der Gleichung 3.3.115.4 wurde das Gewicht des Reaktordruck-
druckgefäßes der Einflußgröße L_1 proportional gesetzt.

$$G \sim \frac{s}{D_i} D_i^2 \cdot H = L_1$$

Diese Beziehung gilt aber nur näherungsweise, da des Gewicht der
Flansche, Stutzen, Verstärkungen usw. nicht berücksichtigt wird.

In der Abb. 3.3.116.1 sind die wirklichen Gewichte der Druck-
gefäße von 5 verschiedenen Reaktorprojekten über der Einflußgröße
 L_1 aufgetragen. Aus dieser Darstellung erhält man für das Ge-
wicht eines Druckgefäßes

$$G \approx G_0 \left(\frac{L_1}{L_{10}} \right)^{0,75} \quad 3.3.116.1$$

mit den Vergleichswerten einer 1000 MW_e-Siedewasser-Reaktor-
Anlage

$$G_0 = 846 \text{ t}$$

$$L_{10} = 30 \text{ m}^3$$

bzw. explizit :

$$\frac{G}{[\text{t}]} \approx 371 \left(\frac{L_1}{10 [\text{m}^3]} \right)^{0,75} \quad 3.3.116.2$$

Außer den zur Berechnung der Gleichung 3.3.116.2 verwendeten
Druckgefäßdaten standen keine weiteren Gewichtsangaben von Reaktor-
druckgefäßen zur Verfügung. Es ist jedoch anzunehmen, daß die
Gleichung 3.3.116.1/2 auch für andere Druckgefäße ohne allzu
große Fehler gilt, sofern die Druckgefäßkonstruktion nicht zu sehr
von der zugrunde gelegten abweicht.

Nach Gleichung 3.3.116.2 läßt sich das Gewicht eines Reaktor-druckgefäßes mit hinreichender Genauigkeit ermitteln. Z.B. ergibt sich für das Reaktordruckgefäß des Siedewasserreaktors Kahl mit einer Leistung von 15 MW_e folgendes Gewicht.

Druckgefäßdaten :

$$D_i = 2,44\text{m}$$

$$H = 8,23\text{m}$$

$$\frac{s}{D_i} = 0,043$$

$$L_1 = \frac{s}{D_i} D_i^2 \cdot H \approx 2,1\text{m}^3$$

$$G \approx 371 \left(\frac{L_1}{10} \right)^{0,75} = 371 \cdot 0,21^{0,75} = 115 \text{ t}$$

wirkliches Gewicht : $G = 103 \text{ t}$

Die Gewichtsabschätzung weist bei diesem ungünstigsten Fall der Abb. 3.3.116.1 einen Fehler von ca. 10 % auf.

Für einen Druckwasserreaktor von ca. 500 MW_e erhält man für das Gewicht des Reaktordruckgefäßes mit den Abmessungen

$$D_i \approx 3,8 \text{ m}$$

$$H \approx 10 \text{ m}$$

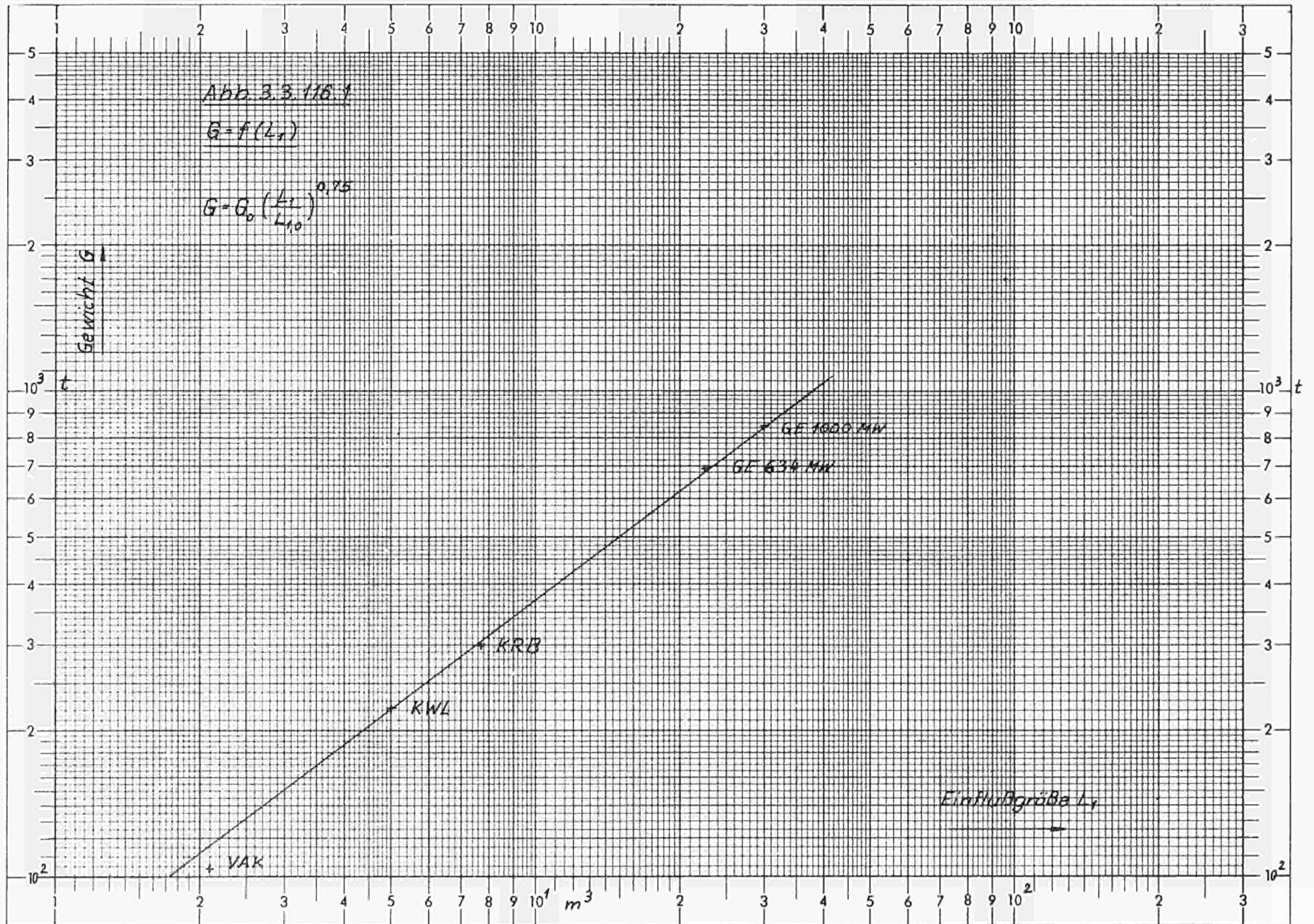
$$\frac{s}{D_i} \approx 0,055$$

$$L_1 = \frac{s}{D_i} D_i^2 \cdot H \approx 7,9 \text{ m}^3$$

$$G \approx 371 \left(\frac{L_1}{10} \right)^{0,75} = 371 \cdot 0,79^{0,75} \approx 311 \text{ t}$$

wirkliches Gewicht : ca. 290 t

Es ergibt sich auch hier eine befriedigende Übereinstimmung, obwohl dieser Reaktortyp nicht zur Bestimmung der Gleichung 3.3.116.2 mit herangezogen wurde.



3.3.1.1.7 Montage- und Transportkosten

Die Kosten für den Transport des Reaktordruckgefäßes sind vom Gewicht und den Abmessungen des Druckgefäßes sowie vom Standort des Kraftwerkes abhängig. Wegen der Abhängigkeit vom Kraftwerksstandort lassen sich für einen allgemeinen Fall, wie er hier vorliegt, keine eindeutigen Angaben machen. Zu diesem Zweck müßte ein einheitlicher Bezugsstandort definiert werden.

Für die Betrachtungen in dieser Studie werden die Transportkosten zusammen mit den Montagekosten abgeschätzt. Unter Montagekosten sollen hier die Kosten der gesamten Installation des Reaktordruckgefäßes verstanden werden. Es ist anzunehmen, daß der prozentuale Anteil dieser Kosten an den Kosten des Reaktordruckgefäßes mit abnehmender Leistung steigt.

Schätzt man die Kosten für Montage und Transport des Reaktordruckgefäßes einer 600 MW_e - Anlage auf ca. 25% der Kosten des Druckgefäßes und den Exponenten auf

$$m = 0,5$$

dann erhält man als Kostenfunktion

$$K_{M,T} = K_{M,T_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,5} \quad 3.3.117.1$$

mit

im Bereich

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e \quad 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

$$K_{M,T_0} = 2,8 \cdot 10^6 \text{ DM für Siedewasser - Reaktoren}$$

$$K_{M,T_0} = 2,46 \cdot 10^6 \text{ DM für Druckwasser - Reaktoren}$$

Die Kosten für die 600 MW_e - Vergleichsanlage K_{M,T_0} wurden zu 25% der in Tab. 3.41.1 und Tab. 3.41.2 berechneten Kosten der Reaktordruckgefäße einer 600 MW_e - Anlage angesetzt.

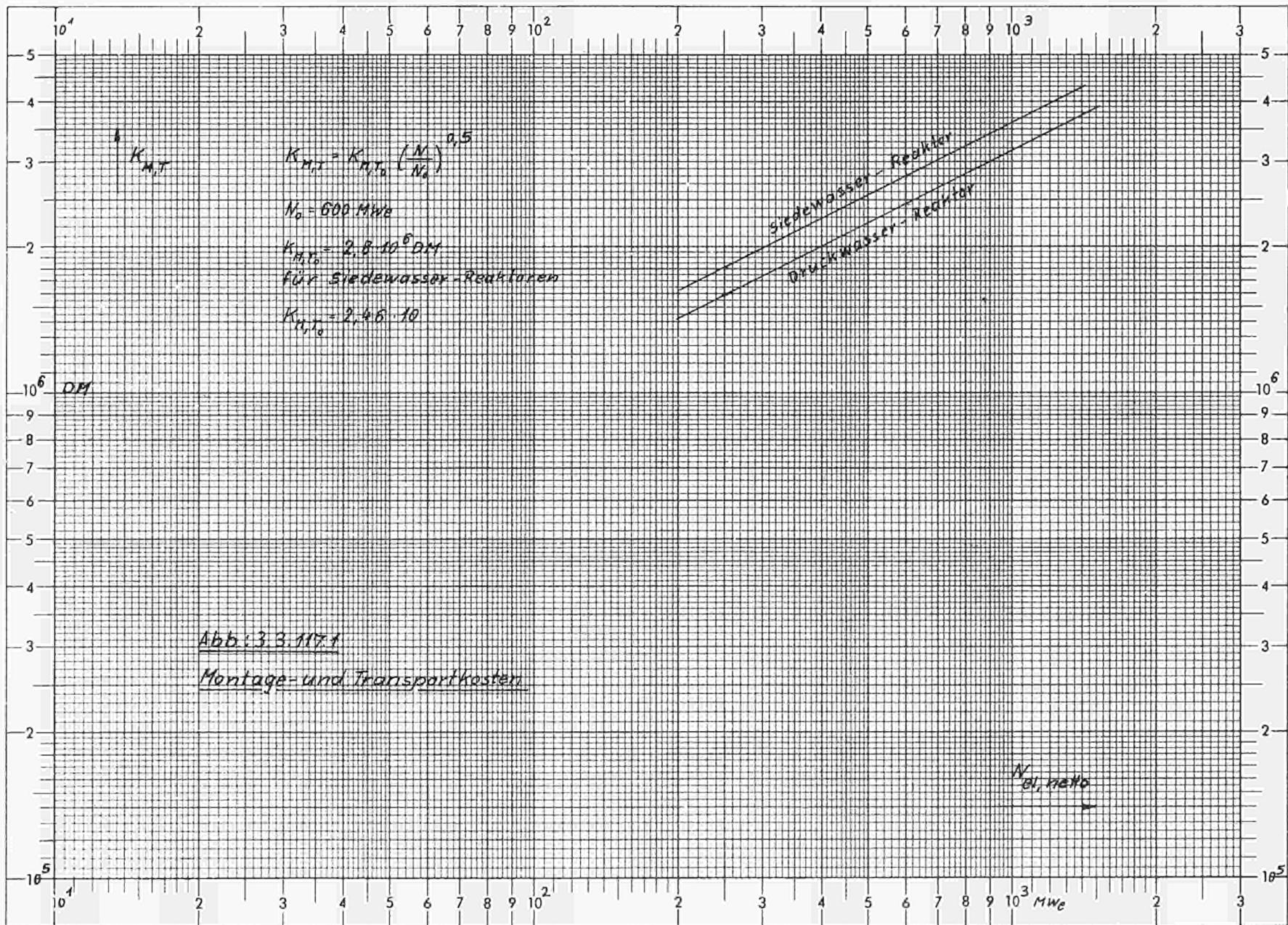


Abb. 3.3.117.1
Montage- und Transportkosten

3.3.1.1.8 Entwicklungstendenzen, Verbilligungsmöglichkeiten,
Grenzgrößen

Die Entwicklung im Reaktorbau tendiert zu höheren Leistungsdichten und damit zur Verkleinerung der Reaktordruckgefäße. Man erwartet bei Siedewasserreaktoren eine Steigerung der Leistungsdichte von 36 MW/m^3 auf $42 \dots 50 \text{ MW/m}^3$ bis zum Jahre 1970. Die gleiche Tendenz ist auch bei Druckwasserreaktoren zu beobachten. Hier wird sich die Leistungsdichte schätzungsweise von 70 MW/m^3 auf etwa $80 \dots 85 \text{ MW/m}^3$ erhöhen lassen.

Bei gleichbleibender Kernhöhe und gleichem thermischen Wirkungsgrad verringert sich der Kerndurchmesser bei einer Erhöhung der Leistungsdichte wie folgt

$$\frac{d_{n_1}}{d_{n_0}} \approx \sqrt{\frac{n_0}{n_1}}$$

Bei Siedewasserreaktoren mit einer Erhöhung der Leistungsdichte von 36 MW/m^3 auf 50 MW/m^3 ergibt sich das Verhältnis der Kerndurchmesser

$$\frac{d_{50}}{d_{36}} \approx \sqrt{\frac{36}{50}} = 0,85$$

und bei Druckwasserreaktoren mit einer Änderung der Leistungsdichte von 70 MW/m^3 auf 85 MW/m^3

$$\frac{d_{85}}{d_{70}} \approx \sqrt{\frac{70}{85}} \approx 0,91$$

Die Druckgefäßdurchmesser verringern sich dann dementsprechend. Weitere Verbesserungen hinsichtlich der Druckgefäßwandstärke sind aus der Verwendung neuer Werkstoffe höherer Festigkeit, der Verbesserung der Berechnungsvorschriften, sowie der Einführung neuartiger Druckgefäßkonstruktionen zu erwarten.

Ein erster Schritt in dieser Richtung ist die kürzlich erfolgte Änderung der ASME-Vorschriften^{*)} für die Berechnung der Reaktor-

^{*)} ASME Boiler and Pressure Vessel Code "Nuclear Vessels" Section III

druckgefäße. Nach Angaben der deutschen Industrie ergibt sich dadurch eine Materialeinsparung von ca. 20%

Neuere Konstruktionen wie Mehrlagenbehälter sind etwa ab 1968 einsetzbar.

Für die bisher hergestellten Reaktordruckbehälter sind amerikanische Stahlarten verwendet worden, über deren Behandlung bei der deutschen Industrie keine Erfahrungen vorlagen. Nach Angaben der Henrichshütte in Hattingen ließen sich die Fertigungskosten bei der Verwendung geeigneter Werkstoffe, deren Behandlung den Firmen vertrauter ist um etwa 2 ... 3% senken.

Eine weitere Kostensenkung ließe sich durch Anwendung der DIN-Prüfvorschriften anstelle der amerikanischen Prüfvorschriften erreichen. Die amerikanischen Prüfvorschriften sehen eine axiale Probenentnahme vor, während die DIN-Vorschriften eine Tangentialprobe vorschreiben. Für eine Axialprobe von 120 mm Länge muß der geschmiedete Schuß um 2 x 150 mm länger gefertigt werden, die Tangentialprobe kann dagegen den normalen Schmiedezugaben entnommen werden.

Die fertigungstechnischen Grenzgrößen für Reaktordruckbehälter in Ringbauweise liegen bei 5,5 ... 6 m Durchmesser. Diese Grenze ist durch die lichten Weiten der vorhandenen Schmiedepressen gesetzt.

Die Ringbauweise wird bei großen Wanddicken aus Festigkeitsgründen der Plattenbauweise vorgezogen. Außerdem ist nach Angaben der Industrie bei Wandstärken $s > 80$ mm die Ringbauweise billiger als die Plattenbauweise.

Die Grenzen zwischen Werkstatt- und Baustellenfertigung sind durch die Transportmöglichkeiten festgelegt. So ist z.B. der Bahntransport hinsichtlich der Abmessungen durch das Bahnprofil und hinsichtlich des Gewichtes durch die maximale Tragfähigkeit der Transportwagen begrenzt.

Auf dem Werkstoffsektor werden entscheidende Verbesserungen erwartet. Die Warmstreckgrenzen der heute im Behälterbau verwendeten Werkstoffe liegen bei 20 ... 25 kp/mm². Man erwartet in Zukunft Materialien mit Warmstreckgrenzen von 30 ... 35 kp/mm². Die Entwicklung dieser neuen Werkstoffe ist jedoch noch nicht abgeschlossen und die Zeitspanne bis zu ihrem praktischen Einsatz noch nicht abzusehen.

Für die Schweißplattierung sind z.Z. zwei Schweißschichten vorgeschrieben. Es besteht jedoch die Möglichkeit mit nur einer Schweiß-

schicht auszukommen, da die Diffusionstiefe des Kohlenstoffes aus dem Grundmaterial in die Plattierung unter den vorliegenden Bedingungen nur 0,4 ... 0,5 mm beträgt, während die Schweißraupe eine Dicke von 4 ... 5 mm hat. Untersuchungen in dieser Richtung werden bereits durchgeführt.

3.3.1.2 Die Kosten der Druckgefäßeinbauten

Unter Druckgefäßeinbauten sollen alle nicht zum Reaktorkern gehörenden Einbauten verstanden werden. Dies sind insbesondere: Gitterplatten, Kernmantel, Kühlmittelführungseinrichtungen und - speziell bei Siedewasserreaktoren - Dampfabscheider, Dampftrockner und Steuerstabführungsrohre. In den Kosten der Druckgefäßeinbauten sind also die Kosten der Brennelemente und Steuerstäbe nicht enthalten.

Nach Firmenangaben betragen die Kosten der Druckgefäßeinbauten bei einem 600 MW_e - Siedewasserreaktor etwa 60...65 % der Kosten des Druckgefäßes. Bei Druckwasserreaktoren wird der Prozentsatz etwas niedriger liegen, da hier die Kosten für die Dampfabscheide- und -trocknungseinrichtung entfallen. Im folgenden soll angenommen werden, daß die Kosten der Druckgefäßeinbauten von 600 MW_e - Druckwasserreaktoren bei etwa 40...50 % der Kosten des Druckgefäßes liegen.

Diese Prozentsätze werden nicht über den ganzen Leistungsbereich konstant sein. Es ist eher anzunehmen, daß sie mit zunehmender Leistung, d.h. mit zunehmender Baugröße des Druckgefäßes, sinken und mit abnehmender Leistung steigen. Aus diesem Grunde wird in der Umgebung von N = 600 MW_e folgender Verlauf der Kosten angenommen

$$K_E = K_{E_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,7} \quad 3.3.12.1$$

mit K_{E_0} = Kosten der Einbauten bei $N_0 = 600 \text{ MW}_e$.

Die Kosten der Druckgefäßeinbauten einer 600 MW_e - Anlage betragen für Siedewasserreaktoren

$$K_{E_0} = (0,60 \dots 0,65) K_D \quad 3.3.12.2$$

Druckwasserreaktoren

$$K_{E_0} = (0,4 \dots 0,5) K_D \quad 3.3.12.3$$

Die Kosten des Reaktordruckgefäßes K_D lassen sich nach Gleichung 3.3.115.18 bzw. 3.3.115.19 berechnen. Für eine 600 MW_e - Siedewasserreaktoranlage mit den Daten:

spez. Leistung	$n = 36 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$
aktive Kernhöhe	$h = 3,70 \text{ m}$
Wirkungsgrad	$\eta = 0,32$
Materialkennwert	$K = 18,8 \text{ kp}/\text{mm}^2$
Betriebsdruck	$p = 72 \text{ kp}/\text{cm}^2$

ergibt sich mit einer Einflußgröße $L_1 = 13,79 \text{ m}^3$ nach Gleichung 3.3.115.18

$$K_D = 0,813 \cdot 10^6 \cdot 13,79 = 11,21 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Für eine 600 MW_e - Druckwasser-Reaktoranlage mit den Daten:

spez. Leistung	$n = 74 \text{ MW}_{th}/\text{m}^3$
aktive Kernhöhe	$h = 3,10 \text{ m}$
Wirkungsgrad	$\eta = 0,32$
Materialkennwert	$K = 18,8 \text{ kp}/\text{mm}^2$
Betriebsdruck	$p = 145 \text{ kp}/\text{cm}^2$

erhält man mit $L_1 = 9,45 \text{ m}^3$ nach Gleichung 3.3.115.19

$$K_D = 1,04 \cdot 10^6 \cdot 9,45 = 9,83 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Die Kosten der Druckgefäßeinbauten einer 600 MW_e - Anlage ergeben sich damit nach Gleichung 3.3.12.2 bzw. 3.3.12.3

für Siedewasser - Reaktoren

$$K_{E_o} = (0,60 \dots 0,65) 11,21 \cdot 10^6 = 6,73 \cdot 10^6 \dots 7,29 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

für Druckwasser - Reaktoren

$$K_{E_o} = (0,4 \dots 0,5) 9,83 \cdot 10^6 = 3,93 \cdot 10^6 \dots 4,92 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Für die weitere Rechnung werden folgende Werte gewählt

600 MW_e - Siedewasserreaktor

$$K_{E_o} = 6,73 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

600 MW_e - Druckwasserreaktor

$$K_{E_o} = 3,93 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

In Abb. 3.3.12.1 ist der Kostenverlauf im logarithmischen Netz mit einem Degressionsexponenten von $m = 0,7$ in der Umgebung von $N=600 \text{ MW}_e$ für Siede- und Druckwasserreaktoren dargestellt.

Zur Extrapolation auf größere Leistungen wurde der Kostenverlauf mit dem Degressionsexponenten $m = 0,7$ in ein lineares Netz (Abb. 3.3.12.2)

übertragen. Entsprechend der Annahme, daß die Kosten kleiner Einheiten degressiv und die großer Einheiten linear verlaufen, (siehe Abschn. 2.4.1) wurde, ausgehend von dem angenommenen Kostenverlauf in der Umgebung von $N = 600 \text{ MW}_e$, der Kostenverlauf linear extrapoliert.

Im Bereich

$$N \geq 500 \text{ MW}_e$$

können die Kosten der Druckgefäßeinbauten unter der Voraussetzung, daß die Schätzungen des Kostenverlaufs richtig sind, durch folgende Gleichungen wiedergegeben werden:

Siedewasser - Reaktoren

$$\frac{K_E}{[\text{DM}]} = 7,7 \cdot 10^3 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 2,11 \cdot 10^6 \quad 3.3.12.4$$

Druckwasser - Reaktoren

$$\frac{K_E}{[\text{DM}]} = 4,63 \cdot 10^3 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 1,15 \cdot 10^6 \quad 3.3.12.5$$

Für die logarithmische Darstellung ergibt sich daraus

$$K_E = K_{E_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.12.6$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{E_0} = 6,73 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{für Siedewasser-Reaktoren}$$

$$K_{E_0} = 3,93 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{für Druckwasser-Reaktoren}$$

$$m = 0,7$$

$$\text{im Bereich } 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 800 \text{ MW}_e$$

Für den Bereich

$$N > 800 \text{ MW}_e$$

gilt

$$N_0 = 800 \text{ MW}_e$$

$$\left. \begin{aligned} K_{E_0} &= 8,23 \cdot 10^6 \text{ DM} \\ m &= 0,79 \end{aligned} \right\} \text{für Siedewasser-Reaktoren}$$

$$\left. \begin{aligned} K_{E_0} &= 4,81 \cdot 10^6 \text{ DM} \\ m &= 0,82 \end{aligned} \right\} \text{für Druckwasser-Reaktoren}$$

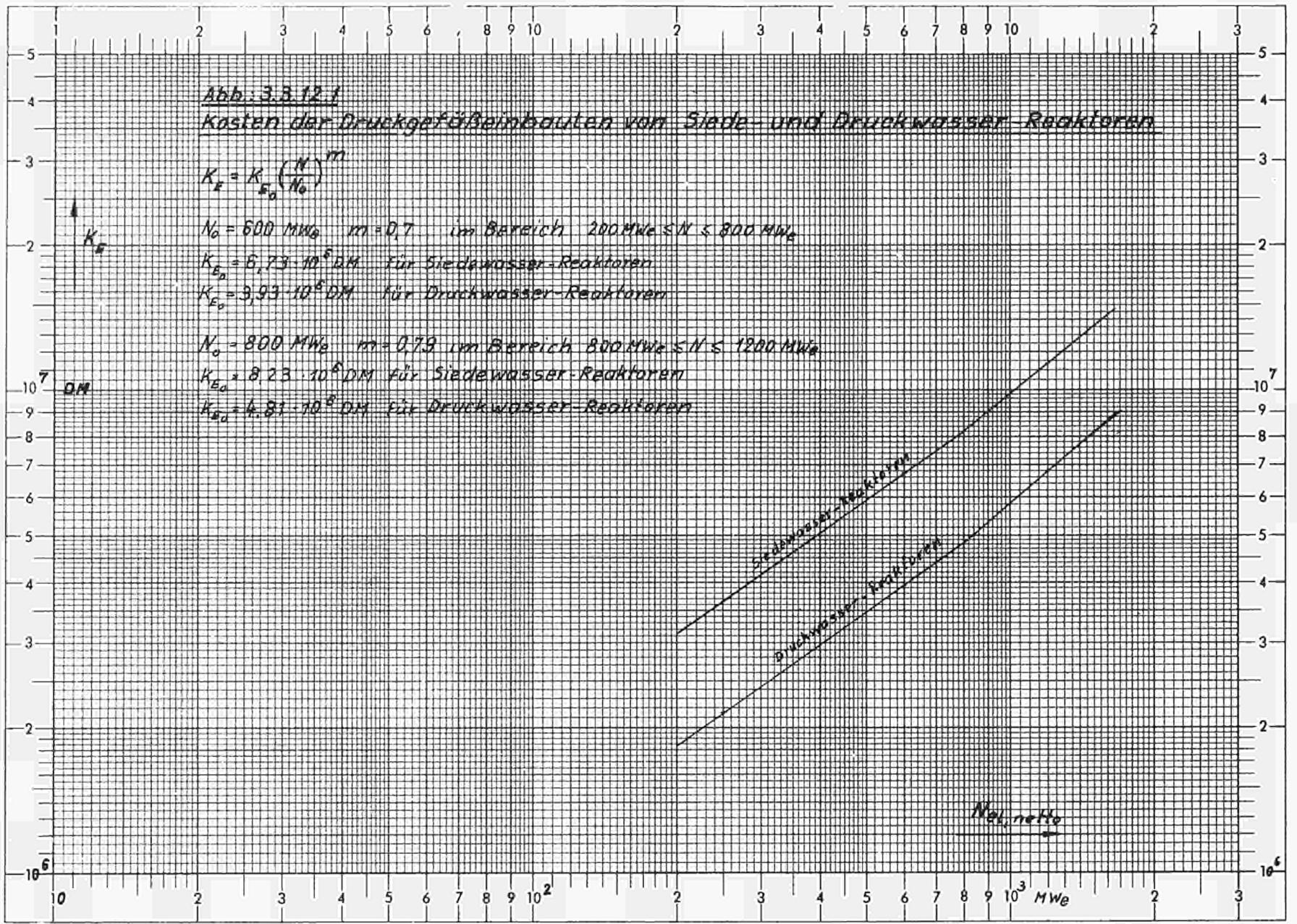
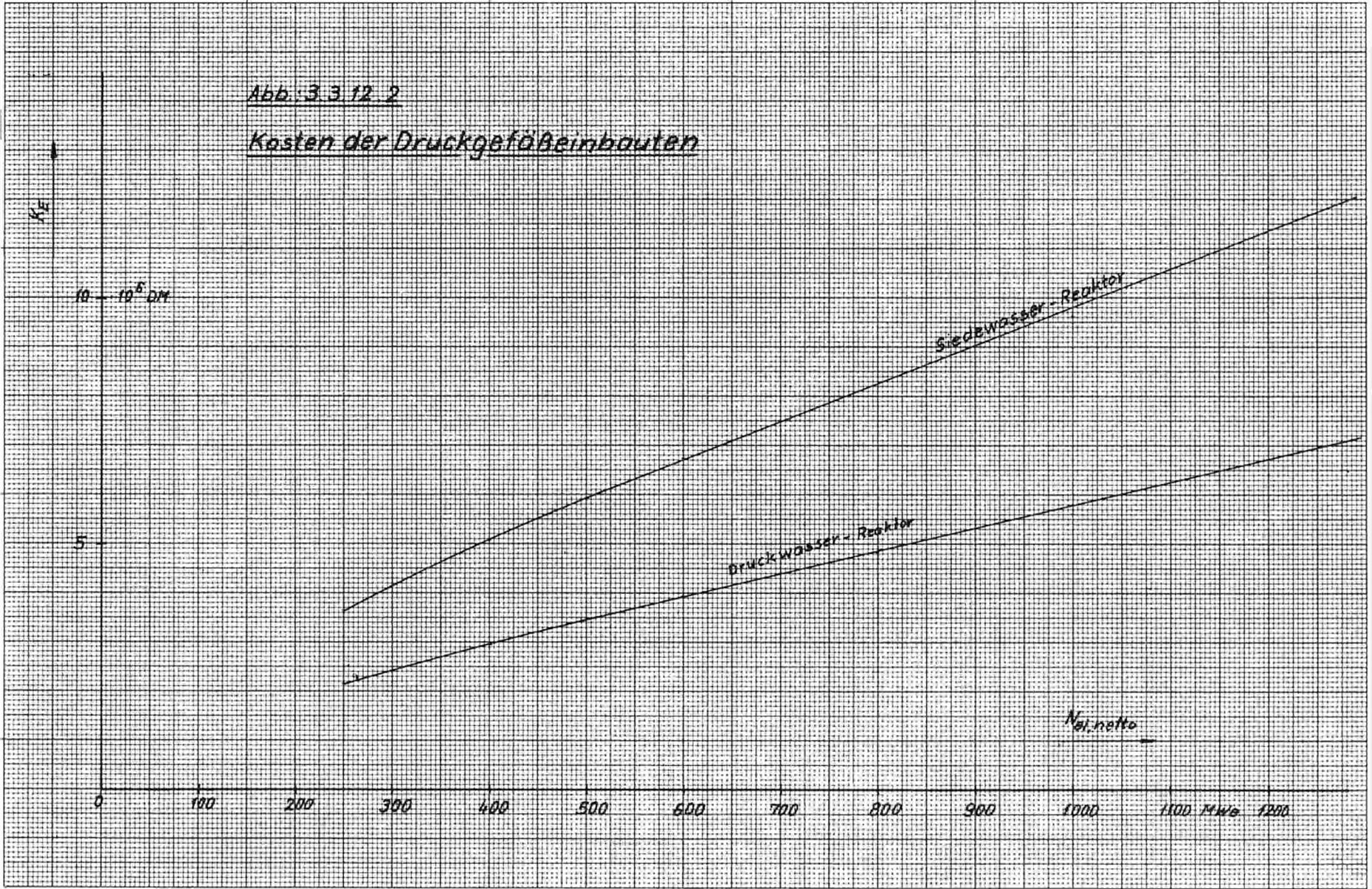


Abb. 3.3.12.2

Kosten der Druckgefäßeinbauten



3.3.1.3 Die Steuerstäbe nebst Antriebseinrichtungen

Zur Bestimmung der Kosten für die Steuerstäbe und ihre Antriebseinrichtungen muß zunächst einmal die Anzahl der Steuerstäbe abgeschätzt werden. Bei den Siedewasserreaktoren hat sich im Laufe der Entwicklung eine bestimmte Anordnung der Steuerstäbe im Gitter herausgebildet, so daß dort Abschätzungen mit einiger Sicherheit möglich sind.

Für die Druckwasserreaktoren gilt das nicht im gleichen Maße. Die langfristige Regelung erfolgt dort durch Borsäure-Zugaben zum Kühlmittel, während die gleichmäßig über den Kern verteilten Regelstäbe nur für kurzfristige Regelmanöver gebraucht werden. Für einen Druckwasserreaktor werden aus diesem Grund weniger Regelstäbe benötigt als für einen Siedewasserreaktor gleicher Leistung. Die Zusammenfassung der Brennstäbe zu Brennelementen und die Anordnung der Regelstäbe ist - im Gegensatz zu Siedewasserreaktoren - bei den einzelnen Druckwasserreaktoren verschieden.

3.3.1.3.1 Abschätzung der Steuerstabanzahl bei Siedewasserreaktoren

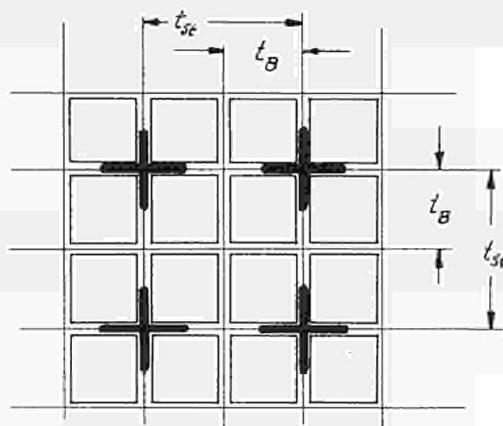


Abb. 3.3.131.1

In der Abb. 3.3.131.1 ist die Anordnung der Steuerstäbe im Kern eines Siedewasserreaktors skizziert. Diese Form der Anordnung ist charakteristisch für fast alle bisher erbauten Siedewasserreaktoren. Die Anzahl der Steuerstäbe kann für eine derartige Anordnung leicht abgeschätzt werden. Jede quadratische Masche mit

der Steuerstabteilung t_{st} als Kantenlänge enthält einen Steuerstab. Teilt man die gesamte Kernfläche durch die Fläche einer Masche, dann ergibt sich näherungsweise die Zahl der Steuerstäbe. Wegen der angenäherten Kreisform des Reaktorkernes ist die auf diese Weise erhaltene Steuerstabzahl jedoch größer als die wirkliche Zahl der Steuerstäbe, da in der Randzone Flächen mit erfasst werden, die keine Steuerstäbe enthalten. Bei konstanter Steuerstabteilung wird der hierdurch gemachte Fehler mit wachsenden Kernquerschnitt geringer. Der Einfluß des Kernquerschnittes läßt sich durch einen veränderlichen Beiwert $c \leq 1$ berücksichtigen.

$$Z_{st} = c_2 \cdot \frac{F_k}{t_{st}^2} \quad 3.3.131.1$$

mit

$$F_k = \frac{\pi}{4} \cdot d_a^2 = c_1^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = (c \cdot c_1)^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot L \quad 3.3.131.2$$

(siehe Gleichung 3.3.111.2 und 3.3.111.8)

$$\begin{aligned} Z_{st} &= (c \cdot c_1)^2 \cdot c_2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{L}{t_{st}^2} \\ &= c_3 \cdot \frac{L}{t_{st}^2} \\ &= c_3 \cdot \frac{N}{\pi \cdot L} \cdot \frac{1}{t_{st}^2} \end{aligned} \quad 3.3.131.3$$

mit

$$c_3 = 0,97 \dots 1$$

$$L = 5,93m^2 \dots 24,3m^2$$

Die Steuerstabteilung beträgt bei den bisher von der GE bzw. AEG gebauten Siedewasserreaktoren

$$t_{st} = 10'' = 25,4cm$$

3.3.1.3.2. Abschätzung der Steuerstabanzahl bei Druckwasserreaktoren

Bei den Druckwasserreaktoren fortgeschrittener Konstruktion werden anstelle der kreuzförmigen Steuerstäbe Absorberfinger verwendet. Während die kreuzförmigen Steuerstäbe außerhalb der Brennelemente angeordnet werden, befinden sich die Absorberfinger innerhalb einzelner Brennelemente auf Gitterplätzen der Brennstäbe. Die einzelnen Absorberfinger eines Brennelementes sind am oberen Ende über eine Traverse an den Steuerstabantrieb gekuppelt. Die Absorberfinger enthaltenden Brennelemente sind regelmäßig über den Kernquerschnitt verteilt. Als Steuerstabeinheit sollen alle Absorberfinger eines Elementes betrachtet werden, die durch ein gemeinsames Antriebselement bewegt werden. Da über die Verteilung der Steuerstäbe über den Kernquerschnitt z.Z. noch keine genauen Angaben vorliegen, soll die Abschätzung über die Brennstabteilung erfolgen. Die Zahl der Brennstäbe läßt sich wie folgt abschätzen:

$$Z_B \approx C \frac{2 \frac{\pi}{4} d}{t_{BS}^2}$$

mit $C \approx 0,9$

Ist die Zahl der Brennstäbe je Absorberfinger z_B bekannt, kann aus der in Gleichung 3.3.132.1 geschätzten Zahl der Brennstäbe die ungefähre Zahl der Absorberfinger berechnet werden

$$Z_A = \frac{Z_B}{z_B} \quad 3.3.132.2$$

darin ist

$$z_B = 54 \dots 60 = \frac{\text{Zahl der Brennstäbe}}{\text{Zahl der Absorberfinger}}$$

Aus der jeweils zu einem Steuerstab vereinigten Zahl von Absorberfingern z_A , läßt sich die Zahl der Steuerstäbe errechnen

$$Z_{st} = \frac{Z_A}{z_A} \quad 3.3.132.3$$

Bei den z.Z. projektierten Anlagen beträgt

$$z_A = 16 = \text{Zahl der Absorberfinger} \\ \text{je Steuerstab}$$

Durch Einsetzen der Beziehungen 3.3.132.1 ... 2 in die Gleichung 3.3.132.3 ergibt sich:

$$z_{st} \approx \frac{\pi}{4} \cdot \frac{C}{z_A \cdot z_B} \cdot \left(\frac{d}{t_{BS}}\right)^2 \\ \approx C_1 \left(\frac{d}{t_{BS}}\right)^2 \quad \text{3.3.132.4}$$

=====

mit

$$C_1 = 0,74 \cdot 10^{-3} \quad \dots \quad 0,80 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{für } d = 3,05\text{m} \quad \dots \quad 2,50\text{m}$$

Für d die Beziehung 3.3.111.2 ein, dann erhält man:

$$z_{st} \approx C_2 \frac{L}{t_{BS}} \quad \text{3.3.132.5a}$$

=====

mit

$$L = \frac{N}{n \cdot h \cdot \gamma}$$

$$\text{und } C_2 = 0,96 \cdot 10^{-3} \quad \dots \quad 1,04 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{für } L = 7,1\text{m}^2 \quad \dots \quad 4,94\text{m}^2$$

Die Werte der Faktoren C wurden aus den oben angegebenen z.Z. Werten D t n ermittelt. Zur Ableitung der Steuerstabzahl einen

Druckwasserreaktors können die Faktoren durch Interpolation bestimmt werden.

Die Teilung der Brennstäbe beträgt z.Z. bei Konstruktionen von Siemens

$$t_{BS} = 1,38 \text{ cm} = 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Die in diesem Abschnitt verwendeten Bezeichnungen haben folgende Bedeutung:

- Z_A = Zahl der Absorberfinger
- Z_B = Zahl der Brennstoffstäbe
- Z_{St} = Zahl der Steuerstäbe
- z_B = Zahl der Brennstoffstäbe je Absorberfinger
- z_A = Zahl der Absorberfinger je Steuerstab
- C = Faktor (abhängig vom Kernuerschnitt)
- d = Kerndurchmesser [m]
- t_{BS} = Teilung der Brennstoffstäbe [m]
- L = $\frac{N}{n \cdot l \cdot 7} =$ Einflußgröße [m²]

Interpoliert man die Werte C_2 linear im doppelt - logarithmischen Netz, dann ergibt sich

$$C_2 = 9,6 \cdot 10^{-4} \left(\frac{7,19}{L} \right)^{0,21};$$

wird diese Beziehung in Gleichung 3.3.132.5a eingesetzt, dann erhält man

$$Z_{St} \approx 1,45 \cdot 10^{-3} \frac{L^{0,79}}{t_{BS}^2}, \quad 3.3.132.5$$

wobei L in der Dimension m²
und t_{BS} - " - m
einzusetzen sind.

3.3.1.3.3 Die Kosten der Steuerstäbe und Steuerstabantriebe

Jeder Steuerstab wird von einem eigenen Antriebsaggregat angetrieben. Sieht man von der Mengendegression, d.h. einer Verbilligung durch die Anfertigung mehrerer gleicher Teile, ab und läßt die Kosten der Energieversorgungseinrichtungen der Antriebsaggregate außer Betracht, dann sind die Anschaffungskosten der Steuerstabeinrichtung der Steuerstabzahl proportional.

$$K_{St} \sim Z_{St} \quad 3.3.133.1$$

Zum Betrieb der Steuerstäbe ist jedoch ein Energieversorgungsnetz, das z.B. bei den hydraulischen Antrieben der Steuerstäbe von Siedewasserreaktoren aus Rohrleitungen, Druckwasserpumpen, Speicherbehälter für Notabschaltung usw. besteht, erforderlich. Für die elektromagnetischen Antriebe der Steuerstäbe von Druckwasserreaktoren, wie sie von Westinghouse und Siemens gebaut werden, ist eine entsprechende Anlage notwendig. Die Kosten dieser Versorgungseinrichtung werden nicht proportional zur Steuerstabzahl wachsen, sondern einen degressiven Charakter haben. Berücksichtigt man ferner, daß die spez. Kosten der Steuerstabeinrichtung auch infolge der Mengendegression mit wachsender Steuerstabzahl abnehmen, so kann anstelle der Beziehung 3.3.133.1 eine Gleichung der Form

$$K_{St} \sim Z_{St}^m \quad 3.3.133.2$$

eingeführt werden, wobei m für Druckwasser- und Siedewasserreaktoren schon wegen der unterschiedlichen Steuerstabzahl verschieden sein wird.

Aus einer Abschätzung der Zahl der Steuerstäbe für eine 600 MW_e - Anlage ergibt sich für

- 1) Siedewasserreaktoren mit $t_{St} = 0,304 \text{ m}$
nach Gleichung 3.3.131.3

$$Z_{St} = 149$$

- 2) Druckwasserreaktoren mit $t_{BS} = 1,38 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
nach Gleichung 3.3.132.5

$$Z_{St} = 40$$

Die spez. Kosten, d.h. die Kosten je Steuerstab, können für beide Anlagen zu

$$k_{St_0} \approx 1,1 \cdot 10^5 \text{DM} \quad 3.3.133.3$$

angenommen werden.

Die Kostendegression wird bei den Steuerstabeinrichtungen der Druckwasserreaktoren wegen der geringen Stückzahl größer sein als die der Steuerstabeinrichtungen von Siedewasserreaktoren. Aus diesem Grunde werden folgende Degressionsexponenten geschätzt:

$$m = 0,8 \quad \text{für Siedewasserreaktoren} \quad 3.3.133.4a$$

$$m = 0,7 \quad \text{für Druckwasserreaktoren} \quad 3.3.133.4b$$

In der Abb. 3.3.133.1 bzw. 3.3.133.2 ist der Kostenverlauf der Steuerstabeinrichtung für Siedewasserreaktoren als Funktion der Steuerstabzahl aufgetragen. Die Extrapolation der Kosten durch eine Gerade im linearen Netz ergibt die Gleichung:

$$\frac{K_{St}}{[\text{DM}]} = 8,69 \cdot 10^4 Z_{St} + 3,38 \cdot 10^6 \quad 3.3.133.5$$

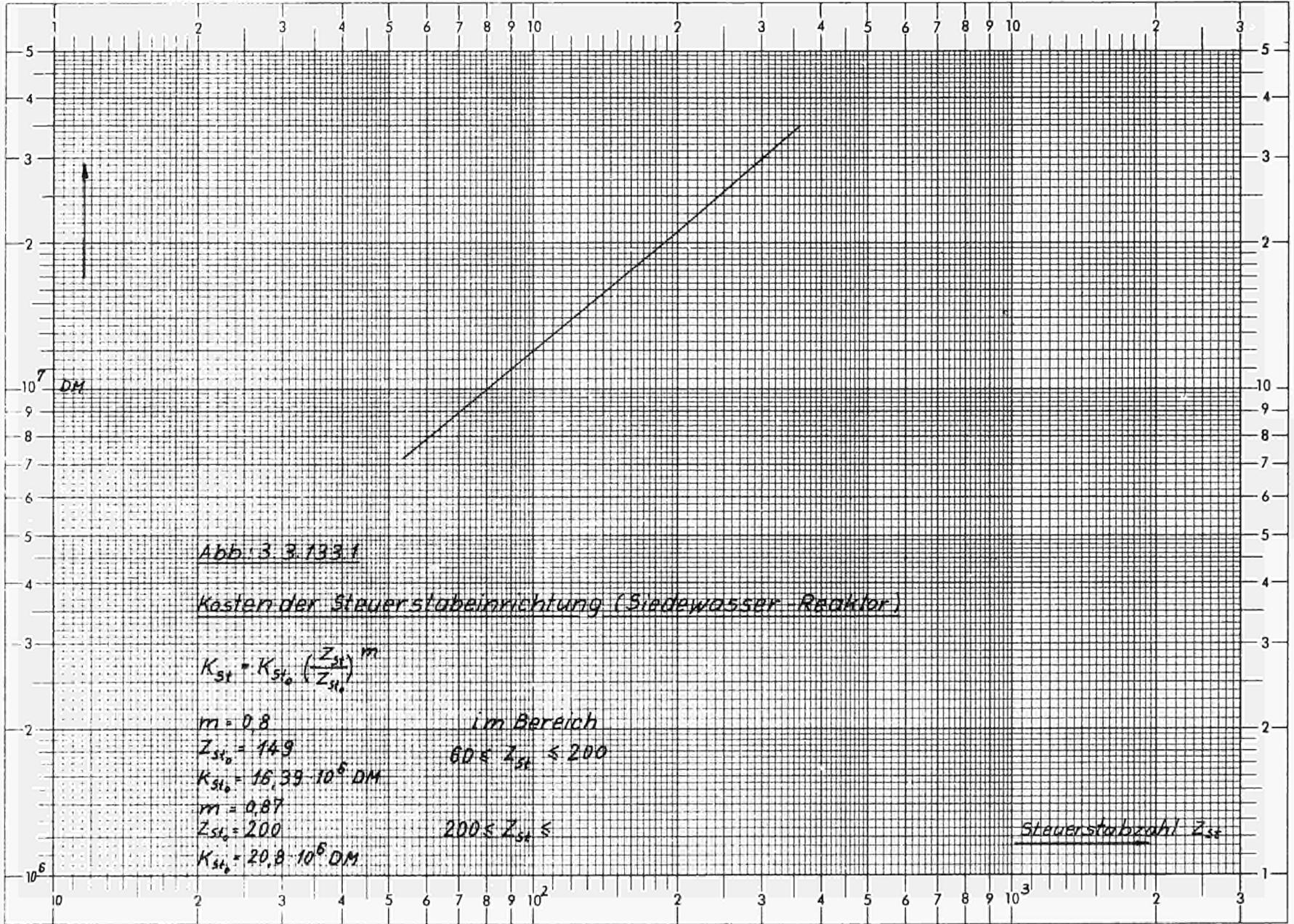
Für die Potenzdarstellung erhält man daraus

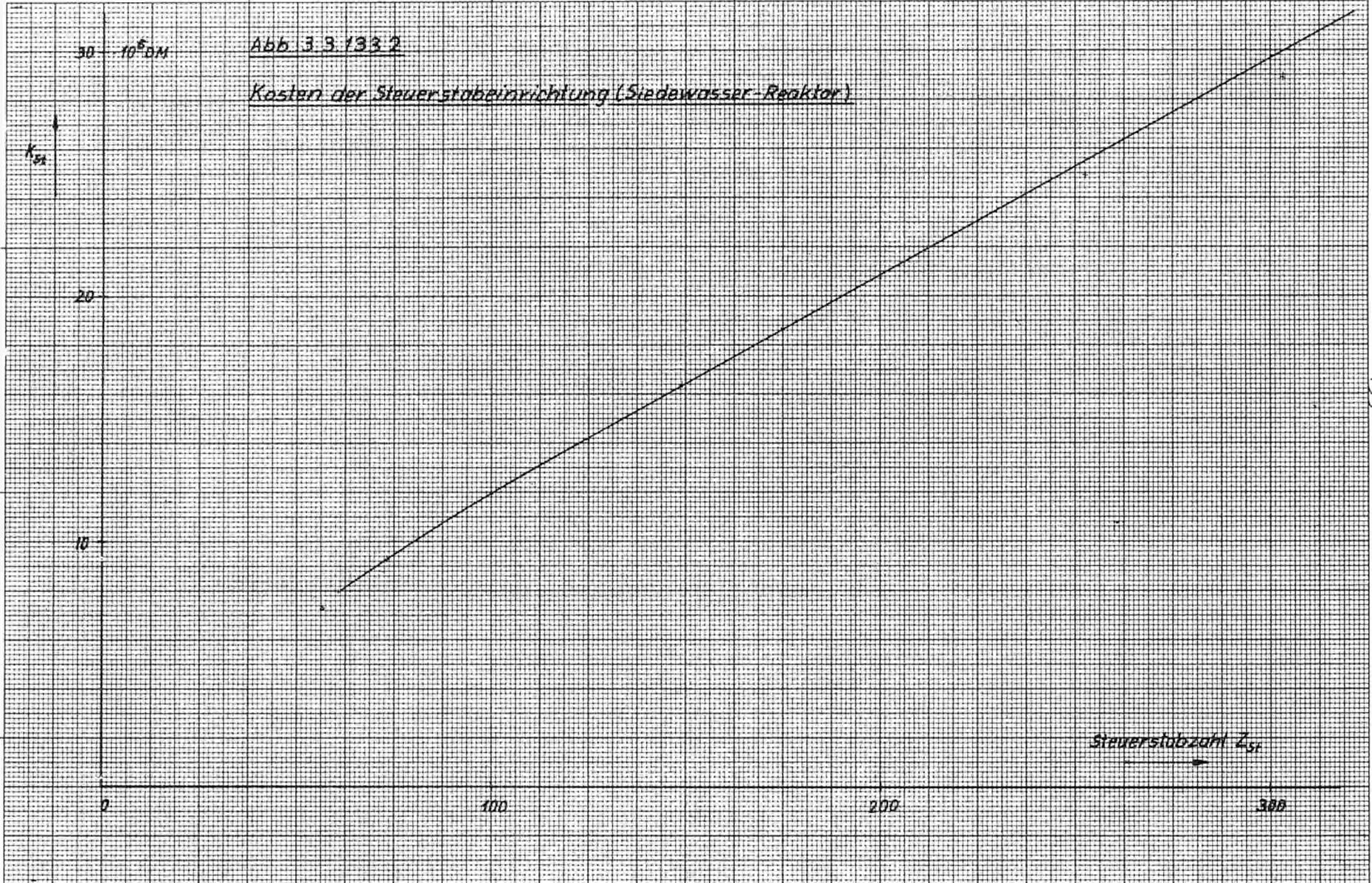
$$K_{St} = K_{St_0} \left(\frac{Z_{St}}{Z_{St_0}} \right)^m \quad 3.3.133.6$$

$$\begin{array}{l} \text{mit } m = 0,8 \\ Z_{St_0} = 149 \\ K_{St_0} = 16,39 \cdot 10^6 \text{DM} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} m \\ Z_{St_0} \\ K_{St_0} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{für} \\ 60 \leq Z_{St} \leq 200 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} m = 0,87 \\ Z_{St_0} = 200 \\ K_{St_0} = 20,8 \cdot 10^6 \text{DM} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} m \\ Z_{St_0} \\ K_{St_0} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{für} \\ 200 < Z_{St} \end{array}$$

$$\text{und } k_{St} = k_{St_0} \left(\frac{Z_{St_0}}{Z_{St}} \right)^{1-m} \quad 3.3.133.7$$





$$\left. \begin{array}{l} \text{mit } m = 0,2 \\ Z_{St_0} = 149 \\ k_{St_0} = 1,1 \cdot 10^5 \text{DM} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{für} \\ 60 \leq Z_{St} \leq 200 \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} m = 0,13 \\ Z_{St_0} = 200 \\ k_{St_0} = 1,04 \cdot 10^5 \text{DM} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{für} \\ 200 < Z_{St} \end{array}$$

Bei der Bestimmung der Kosten der Steuerstabeinrichtung von Druckwasserreaktoren ist noch die Veränderung der Steuerstablänge und damit des Steuerstabgewichtes bei verschiedenen Auslegungsleistungen zu berücksichtigen, da sich die Kosten der Steuerstabantriebsorgane mit der Antriebsleistung ändern. Setzt man gleichen Querschnitt voraus, so ändert sich das Steuerstabgewicht mit der Steuerstablänge. Die Antriebsleistung ist bei gleicher Beschleunigung dem Gewicht proportional. Unter der Annahme, daß sich die Kosten der Steuerstabantriebe als Funktion der Leistung mit einem Degressions-exponenten von 0,7 ändern, ergibt sich für die Kosten der Steuerstabeinrichtung von Druckwasserreaktoren

$$\begin{aligned} K_{St} &= K_{St_0} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7} \left(\frac{Z_{St}}{Z_{St_0}}\right)^{0,7} \\ &= K_{St_0} \left(\frac{h Z_{St}}{h_0 Z_{St_0}}\right)^{0,7} \end{aligned} \quad 3.3.133.8$$

$$\begin{array}{l} \text{mit } Z_{St_0} = 40 \\ K_{St_0} = 4,4 \cdot 10^6 \text{DM} \\ h_0 = 3,1 \text{ m} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{für} \\ 20 < Z_{St} < 70 \end{array}$$

und für die spez. Kosten

$$k_{St} = k_{St_0} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{0,7} \left(\frac{Z_{St_0}}{Z_{St}}\right)^{0,3} \quad 3.3.133.8$$

mit

$$z_{St_0} = 40$$

$$k_{St_0} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ DM}$$

$$h_0 = 3,1 \text{ m}$$

Der Kostenverlauf ist in Abb. 3.3.133.3 im linearen Netz dargestellt.

Zur bequemeren Abschätzung der Kosten sind in Abb. 3.3.133.4 die Kosten der Steuerstabeinrichtungen für Druck- und Siedewasserreaktoren als Funktion der Kraftwerks-Nettoleistung aufgetragen. Bei der Benutzung dieser Abbildung und der nachfolgenden Formeln ist zu beachten, daß bei der Berechnung der Werte den einzelnen Leistungen entsprechende Steuerstabzahlen zugerechnet wurden.

Die Approximation im doppelt-logarithmischen Netz ergibt

für Siedewasserreaktoren

im Bereich $200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$

$$K_{St} = K_{St_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,83} \quad 3.3.133.9$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{St_0} = 16,7 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

für Druckwasserreaktoren

im Bereich $200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$

$$K_{St} = K_{St_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,56} \quad 3.3.133.10$$

mit

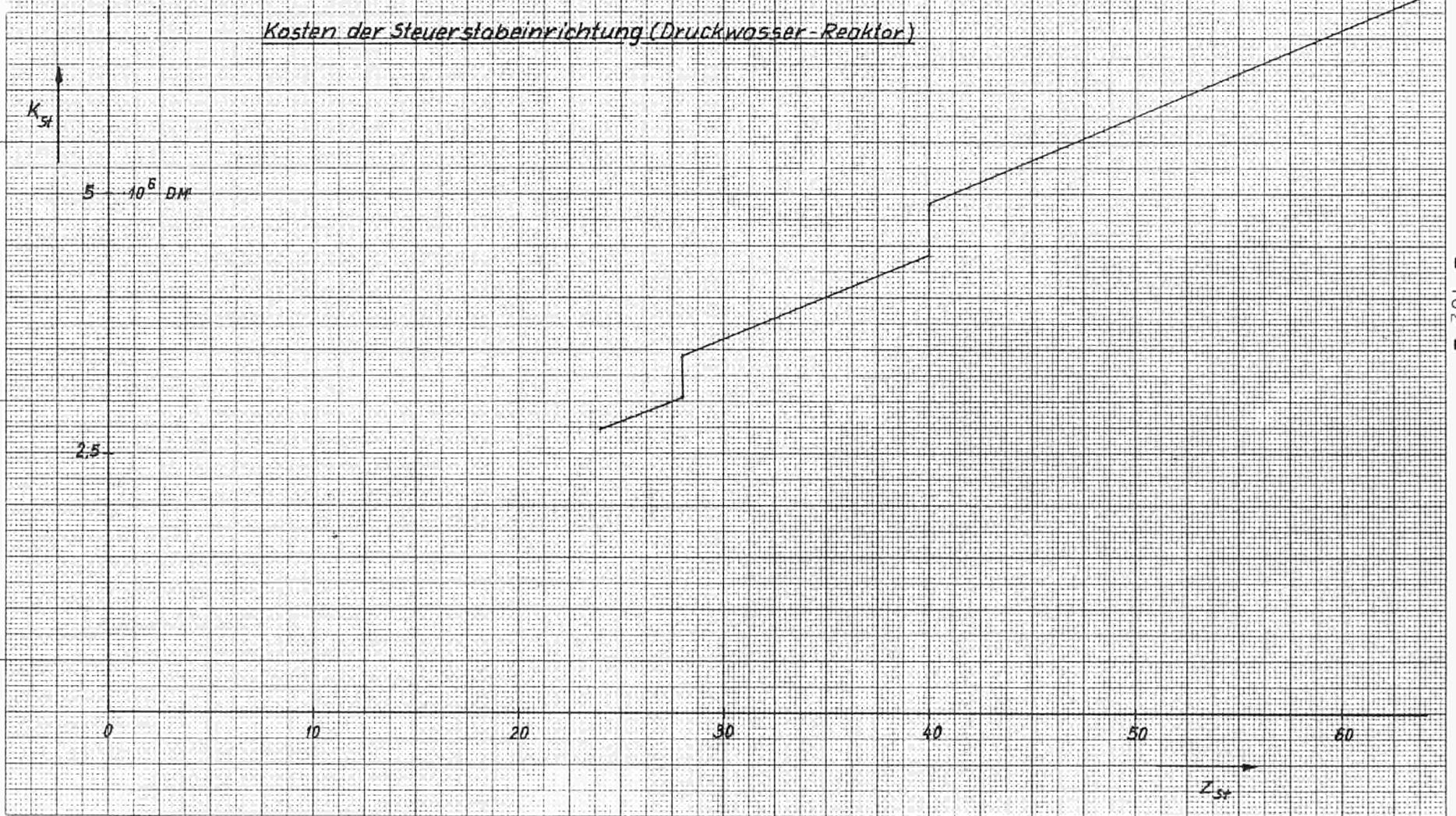
$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

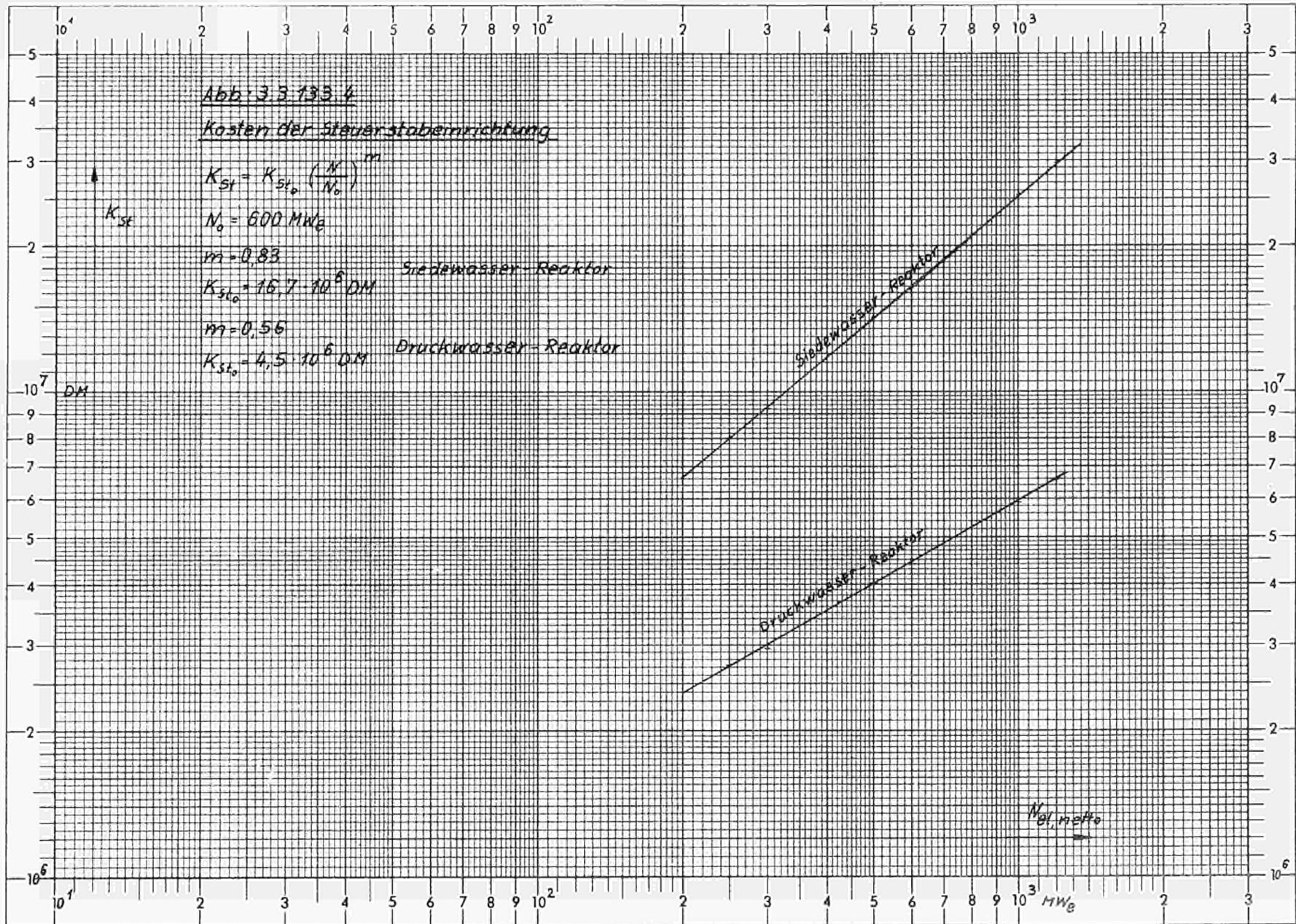
$$K_{St_0} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Um eine bessere Näherung zu erreichen, wurden die Werte K_{St_0} gegenüber denen in den Gleichungen 3.3.133.6 und .8 geringfügig erhöht.

Abb. 3.3.133.3

Kosten der Steuerstabeinrichtung (Druckwasser-Reaktor)





3.3.1.3.4. Entwicklungstendenzen, Verbilligungsmöglichkeiten

Nach einem Bericht der G. E. *) wird sich die Steuerstabteilung bei Siedewasserreaktoren von $t_{St} = 25,4$ cm auf $t_{St} = 30,5 \dots 33,0$ cm bei künftigen Projekten erhöhen, zugleich wird eine Heraufsetzung der Leistungsdichte von $n = 36$ MW/ m³ auf $n = 42 \dots 50$ MW/ m³ angestrebt. Außerdem soll die Länge der Brennelemente von $h = 366$ cm auf $h = 381$ cm vergrößert werden.

Die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die Zahl der Steuerstäbe zeigt die Tabelle 3.3.134.1.

Die Zahl der Steuerstäbe wird erheblich verringert. Schon bei einer Leistungsdichte von $n = 42$ MW / m³ und einer Steuerstabteilung von $t_{St} = 0,33$ m wird weniger als die Hälfte der in den heutigen Ausführungen erforderlichen Steuerstäbe benötigt. Nach Gleichung 3.3.131.3 ergibt sich für $N = \text{const.}$ und $h = \text{const.}$

$$\frac{z_{St,1970}}{z_{St,1964}} \approx \frac{(n t_{St,1964}^2)}{(n t_{St,1970}^2)} = \frac{35,4 \cdot 0,254^2}{42 \cdot 0,33^2} \approx 0,5$$

Die vergrößerten Steuerstababmessungen machen jedoch eine Verstärkung der Antriebsaggregate erforderlich, die mit einer Erhöhung der Kosten verbunden sein wird.

Nimmt man an, daß die Kosten eines Steuerstabantriebes eine Funktion des Steuerstabgewichtes sind, dann ergibt sich bei Änderung des Querschnittes q und der Höhe h des Steuerstabes unter Verwendung der Gleichung 3.3.133.6

$$K_{St} = K_{St_0} \left(\frac{q h}{q_0 h_0} \right)^{m_1} \left(\frac{z_{St}}{z_{St_0}} \right)^m \quad 3.3.134.1$$

Für die Abschätzung der Verbilligung soll näherungsweise angenommen werden, daß

$$q \sim t_{St} \quad 3.3.134.2$$

und

$$m_1 = m \quad 3.3.134.3$$

*) G. WHITE "Developments in boiling water reactors"
Aug. 1964 pres. before the Third International
Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energie

Aus Gleichung 3.3.131.3 erhält man bei konstanter Leistung N und konstantem Wirkungsgrad η das Verhältnis

$$\frac{z_{St}}{z_{St_0}} = \frac{n_0 h_0 t_{St_0}^2}{n h t_{St}^2} \quad 3.3.134.4$$

Aus den Gleichungen 3.3.134.1/4 ergibt sich für das Kostenverhältnis bei gleicher Leistung und gleichem Wirkungsgrad

$$\frac{K_{St}}{K_{St_0}} = \left(\frac{n_0 t_{St_0}}{n t_{St}} \right)^m \quad 3.3.134.5$$

Bezeichnen die Größen mit dem Index o die z. Z. (d. h. 1965) üblichen Werte

$$n_0 = 36 \text{ MW/ m}^3$$

$$t_{St_0} = 30,5 \text{ cm}$$

und werden für das Jahr 1970 folgende Werte angenommen

$$n = 42 \dots 50 \text{ MW/ m}^3$$

$$t_{St} = 33 \text{ cm,}$$

dann ergeben sich unter Verwendung der Exponenten aus Gleichung 3.3.133.6 folgende Kostenverhältnisse

Für $N \leq 600 \text{ MW}_e$

$$\frac{K_{St,1970}}{K_{St,1965}} = 0,792^{0,8} \dots 0,665^{0,8} = 0,83 \dots 0,722$$

Für $N > 600 \text{ MW}_e$

$$\frac{K_{St,1970}}{K_{St,1965}} = 0,792^{0,87} \dots 0,665^{0,87} = 0,816 \dots 0,701$$

Außerdem ergeben sich Verbilligungen beim Druckbehälter, da weniger Stutzen angeschweißt werden müssen.

Bei den Druckwasserreaktoren ist eine Verringerung der Steuerstabzahl, zumindest in dem bei Siedewasserreaktoren beobachteten Umfang, nicht zu erwarten.

Tab. 3.3.134.1

Stand der Entw.	L	N	c ₃	n	h	γ	t _{st}	Z _{st}
	m ²	MWe	-	MW/m ³	m	-	m	-
1964	24,2	1000	1	35,4	3,66	31,9	0,254	375
1970	20,3	"	0,994	42	"	32	0,305	217
"	20,3	"	0,994	"	3,66	"	0,33	185
"	19,5	"	0,992	"	3,81	"	0,305	208
"	19,5	"	0,992	42	3,81	"	0,33	178
"	17,1	"	0,988	50	3,66	"	0,305	182
"	17,1	"	0,988	"	3,66	"	0,33	155
"	16,1	"	0,987	"	3,81	"	0,305	171
1970	16,1	1000	0,987	50	3,81	32	0,33	146
1965	14,1	570	0,983	36,2	3,66	30,5	0,305	149

3.3.1.4 Die Pumpen des Umwälzkreises

In diesem Abschnitt sollen lediglich die Pumpen des Umwälzkreises und ihre Anlagekosten behandelt werden. Die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen werden im Abschnitt 3.3.1.11 untersucht.

Zur Abschätzung der Umwälzleistung, d. h. der Pumpenleistung, und damit der Anlagekosten sind Überlegungen über den Zusammenhang zwischen der elektrischen Kraftwerks - Nettoleistung und der umzuwälzenden Kühlmittelmenge anzustellen.

Bei Siedewasserreaktoren ist die je Zeiteinheit an das Kühlmittel abgegebene Wärmemenge

$$Q = G \cdot c_p \cdot \Delta \vartheta + G_D \cdot r$$

mit

G = umgewälzte Wassermenge je Zeiteinheit

c_p = spezifische Wärme bei Reaktordruck und Betriebstemperatur

$\Delta \vartheta$ = Aufwärmspanne des Wassers zwischen Eintritt in den Kern und Austritt (Unterkühlung)

G_D = im Reaktor erzeugte Dampfmenge je Zeiteinheit

r = Verdampfungswärme bei Betriebsdruck

Umgeformt ist

$$Q = G \left(c_p \cdot \Delta \vartheta + \frac{G_D}{G} \cdot r \right) \quad 3.3.14.1$$

Diese Wärmeleistung ist proportional zur Kraftwerksleistung

$$Q \sim N$$

Daraus ergibt sich

$$G \sim \frac{N_{el., \text{ netto}}}{\eta \left(c_p \cdot \Delta \vartheta + \frac{G_D}{G} \cdot r \right)} \quad 3.3.14.2$$

Für die Siedewasser - Reaktoren neuerer Bauart sind c_p und r etwa

konstant, da der Betriebsdruck für alle bei ca. 70 ata und die entsprechende Siedetemperatur bei 286°C liegt. Für einige gebaute bzw. geplante Kernkraftwerke mit Siedewasserreaktoren sind die für diese Betrachtungen maßgeblichen Werte in der Tabelle 3.3.14.1 zusammengestellt und im Diagramm 3.3.14.1 aufgetragen. Es besteht der lineare Zusammenhang zwischen der umzuwälzenden Wassermenge und der elektrischen Nettoleistung

$$\frac{G}{\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]} = 0,86 \cdot 10^6 \cdot \frac{N_{el \text{ netto}}}{[\text{MWe}]} \cdot \frac{\left[\frac{\text{MWe netto}}{\text{MW th}}\right]}{\eta} \cdot \frac{\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right]}{c_p \cdot \Delta v^\circ + \frac{G_D}{G} \cdot r}$$

3.3.14.3

Die Aufwärm spanne Δv° des Wassers liegt bei den betrachteten Reaktoren mit über 10 MWe im Mittel bei ca. 12°C; was einer Enthalpiezunahme des Wassers beim Durchgang durch den Kern von etwa 15,6 kcal/kg entspricht.

Das Verhältnis G_D/G liegt bei den größeren Reaktoren bei 0,08 bis 0,1; d.h. etwa 8 bis 10 % der Umwälzmenge verdampfen.

Für Druckwasserreaktoren ist der Ansatz 3.3.14.1 ebenfalls brauchbar, wenn man berücksichtigt, daß kein Wasser verdampft, man erhält also

$$Q = G \cdot c_p \cdot \Delta v^\circ$$

Diese Wärmeleistung ist proportional zur Kraftwerksleistung

$$Q \sim N,$$

und man erhält

$$G \sim \frac{N_{el}}{\eta \cdot c_p \cdot \Delta v^\circ} \quad 3.3.14.4$$

oder

$$\frac{G}{\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]} = 0,86 \cdot 10^6 \cdot \frac{N_{el}}{[\text{MWe}]} \cdot \frac{\left[\frac{\text{MWe netto}}{\text{MW th}}\right]}{\eta} \cdot \frac{\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}\right]}{c_p \cdot \Delta v^\circ} \quad 3.3.14.5$$

Die Gleichungen 3.3.14.3 und 3.3.14.5 lassen sich durch Einführen der entsprechenden Einflußgrößen auch in der einfachen Form

$$\frac{G}{[\text{kg/h}]} = 0,86 \cdot 10^6 \frac{L_2}{[\text{MW}_e \text{ kg/kcal}]} \quad 3.3.14.5a$$

mit

$$L_2 = \frac{N_{\text{el., netto}}}{\eta \left(c_p \Delta \vartheta + \frac{G_D}{G} \cdot r \right)} \quad \begin{array}{l} \text{für Siedewasser -} \\ \text{Reaktoren} \end{array} \quad 3.3.14.6$$

und

$$L_2 = \frac{N_{\text{el., netto}}}{\eta c_p \Delta \vartheta} \quad \begin{array}{l} \text{für Druckwasser -} \\ \text{Reaktoren} \end{array} \quad 3.3.14.7$$

schreiben.

In diese Beziehungen sind

$N_{\text{el., netto}}$	in der Dimension	MW	
$\Delta \vartheta$	"	"	$^{\circ}\text{C}$
c_p	"	"	$\text{kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$
r	"	"	kcal/kg

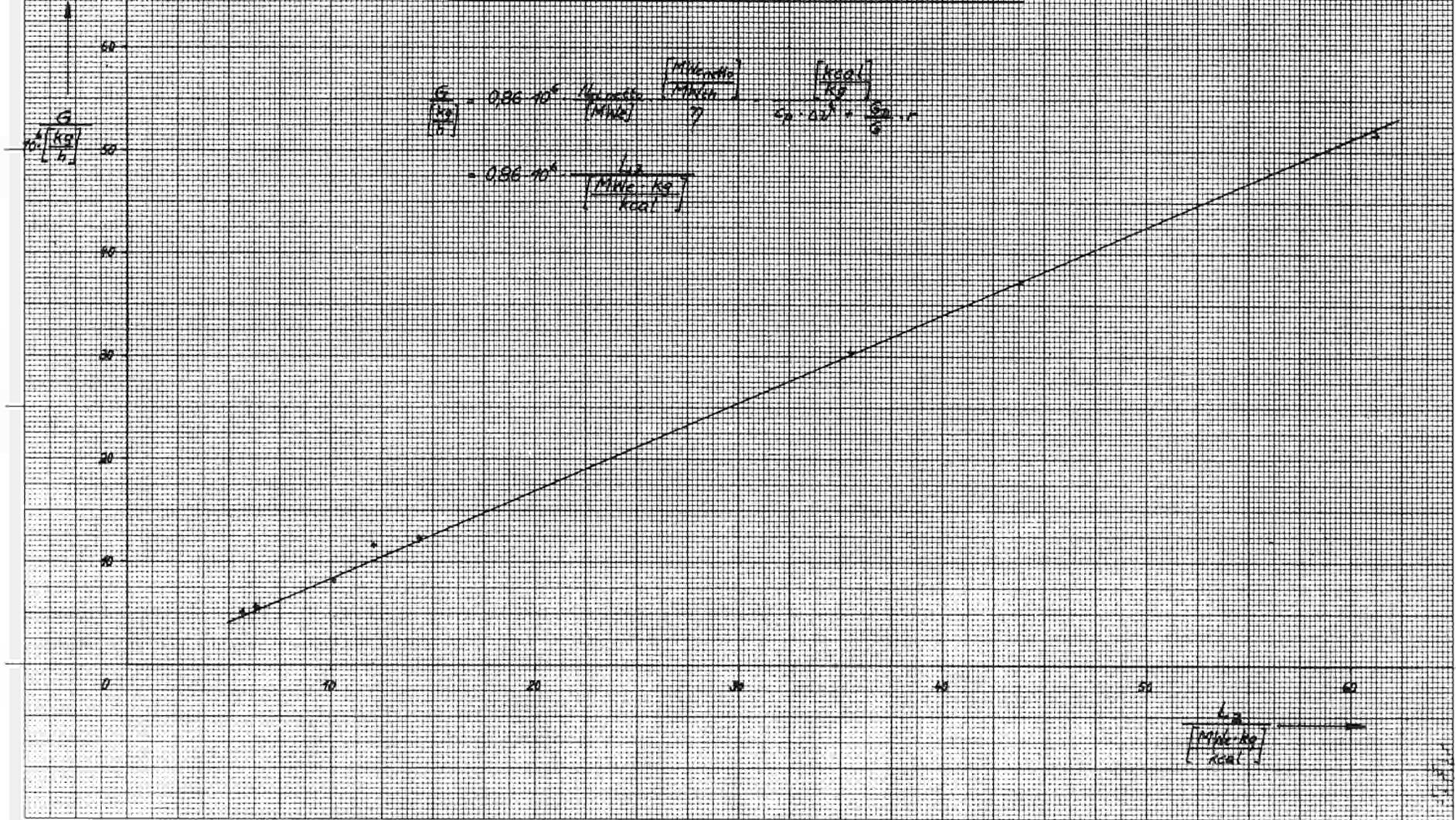
einzusetzen.

Anlage	$N_{el\ netto}$ [MWe]	η [%]	Primärdruck [ata]	Δv [°C]	Δi [kcal/kg]	G [10^6 kg/h]	G_D [10^3 kg/h]	$\frac{G_D}{G}$	$\frac{N_{el}}{\eta \left(c_p \cdot \Delta v + \frac{G_D}{G} \cdot r \right)}$
Dresden	184,0	29,4	71,35	24	31,2	11,62	636	0,0547	12,2844
Humboldt Bay	47,85	29,0	71,71	6,89	8,96	5,675	270	0,0475	6,3207
Pathfinder	47,10	~30	73,82	6,61	8,6	5,266	275	0,0522	5,7221
SENN	155,85	30,8	71	15	19,5	8,300	700	0,0843	10,1338
AEG 600	570	30,5	71,3	11,5	14,9	30,5	3185	0,1044	35,5036
GE 634	634	31,42	71,3	10,0	13,0	36,96	3386,8	0,0916	43,8014
GE 1000	1005	31,46	71,3	12,05	15,67	51,75	5234,6	0,1011	61,2427
KRB	237	29,6	71,3	[~19,5]	[~25,4]	12,25	1020	0,0832	14,4
KWL	160		72	6	~7,8	12,0	980	0,0817	13,8

Tab. 3.3.14.1

Abb. 3.3.14.1

Kühlmitteldurchsatz in Siedewasserreaktoren

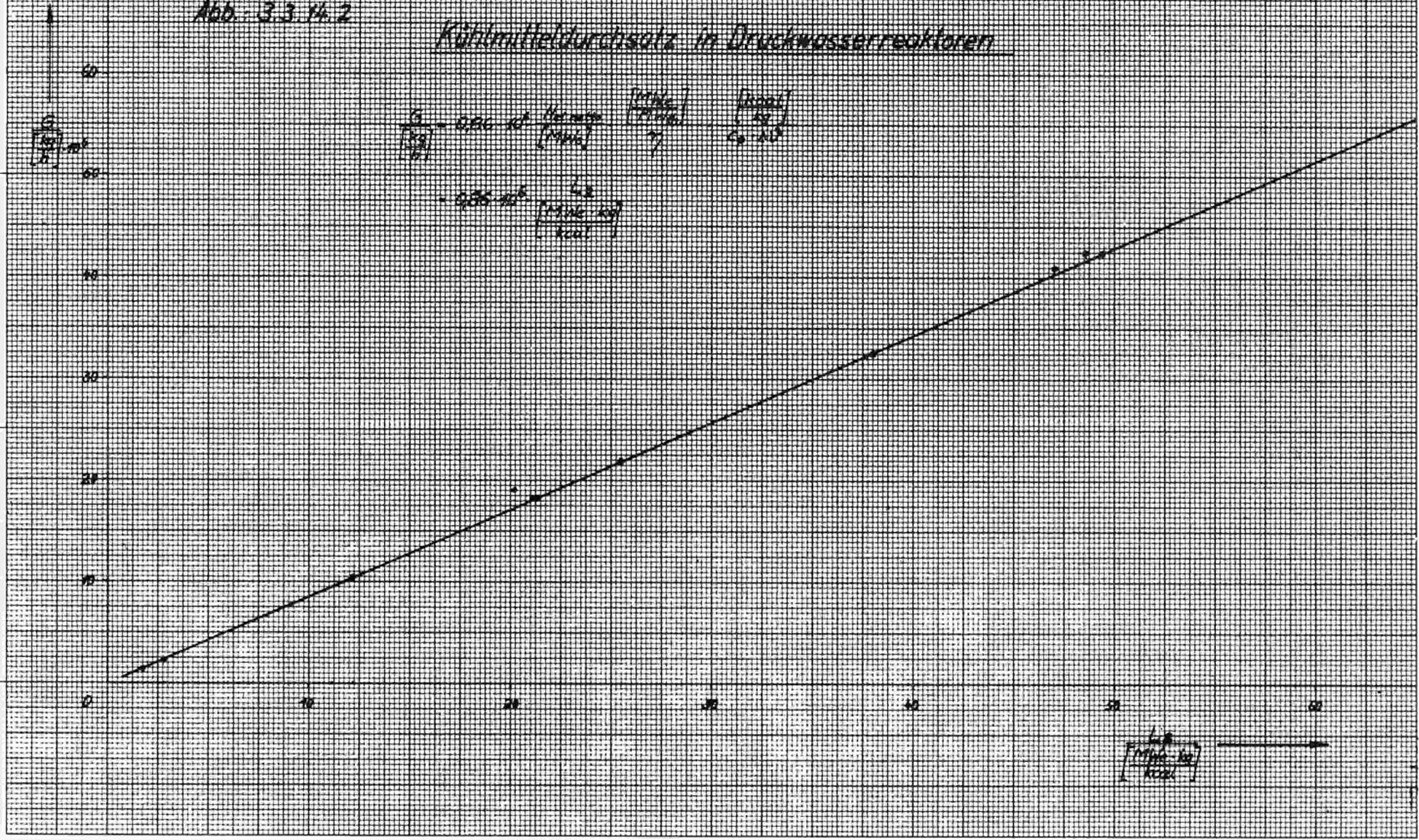


Anlage	$\frac{N_{el}}{[MWe]}$	η [%]	Primär- druck p[atü]	$\frac{\dot{V}_E}{[^\circ C]}$	$\frac{\dot{V}_A}{[^\circ C]}$	$\frac{\Delta \dot{V}}{[^\circ C]}$	$\frac{\Delta \dot{V}^*}{[^\circ C]}$	$\frac{G}{[10^6 kg/h]}$	$\frac{c_p}{[kcal/kg \text{ grad}]}$
Shippingport I	60	26	140,6	264,4	281	16,6	54,5	10,60	1,13
Yankee	141	29,1	140,6	258	278	20	57,5	19,07	1,36
Saxton	3,25	16,25	140,6	271	282	11	53,5	1,30	1,20
BR - 3	10,5	25,7	140,6	255	268	13	67,5	2,265	1,19
SELNI	257	31,2	140,6	266	298	32	37,5	18,35	1,21
SENA	266	29,5	140,6	265	295,5	30,5	40,0	18,35	1,39
San Onofre	375	31	144,1	286	310	24	27,5	32,60	1,33
Con. Yankee	462	31,3	144,1	286	308	22	29,5	42,50	1,36
LADWP (Malibu)	465	31	144,1	286	308	22	29,5	42,50	1,38
KBWP	284	31,3	144	281,5	309	27,5	28,5	22,00	1,29
SSW - Studie	513	31,15	144	284,6	311,4	26,8	26,1	40,50	1,30

Tab. 3.3.14.2

Abb. 3.3.14.2

Kühlmitteldurchsatz in Druckwasserreaktoren



$G = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} \cdot \frac{3600}{1000}$

$G = \frac{Q}{4.18 \cdot \Delta T} \cdot 3.6$

$G = \frac{Q}{\Delta T} \cdot 0.86$

$Q = G \cdot c_p \cdot \Delta T$

$Q = G \cdot 4.18 \cdot \Delta T$

$Q = G \cdot \Delta T \cdot 4.18$

Für einige gebaute bzw. geplante Anlagen sind in Tabelle 3.3.14.2 Daten zusammengestellt und in Diagramm 3.3.14.2 aufgetragen.

Die zulässige Kühlmittelaustrittstemperatur v_A^l ist bei Druckwasserreaktoren bestimmt durch die Siedetemperatur v_s^l beim Betriebsdruck p und einem Sicherheitsabstand vom Siedepunkt Δv^* . Es gilt also

$$v_A^l = v_s^l(p) - \Delta v^*$$

Durch zunehmende Betriebserfahrung ist es gelungen, den Sicherheitsabstand Δv^* weitgehend zu verringern. Diese Tendenz ist in der Tabelle 3.3.14.2 deutlich zu erkennen. Z.B. hat sich der Sicherheitsabstand von ca. 58 ... 68°C bei älteren Konstruktionen auf ca. 26 ... 28°C bei neueren Konstruktionen verringert. Durch diese Maßnahmen lassen sich günstigere Dampfzustände bei gleichem Auslegungsdruck erreichen. Die Erhöhung des Druckes von 140,6 auf 144 atü bei den moderneren Konstruktionen erfolgte aufgrund einer Optimierung des Systems.

Die Höhe der Eintrittstemperatur v_E^l des Kühlmittels in den Reaktor bzw. in den Reaktorkern, bestimmt die Aufwärmespanne und damit die durchzusetzende Kühlmittelmenge. Die günstigste Größe dieser Aufwärmespanne bei Nenmlast bzw. bei Bestlast hängt von einer Reihe von Einflüssen mit gegenläufiger Tendenz ab. Sie läßt sich nur durch eine Optimierungsbetrachtung bestimmen. (Siehe z.B. RIEZLER WALCHER : " Kerntechnik " Teubner-Verlagsges., Stuttgart 1958 Kap. 3.429 ff)

Mit Hilfe der Gleichungen 3.3.14.3 und 3.3.14.5 können die Kühlmittelumwälzmengen ermittelt werden, wenn die entsprechenden Daten bekannt sind. Zur ungefähren Abschätzung der Umwälzmenge kann man von Durchschnittswerten der Auslegungsdaten ausgehen. Für Siedewasserreaktoren wurden folgende Werte der Aufstellung einer Schätzformel zugrunde gelegt:

$$\Delta_i = 15,6 \text{ kcal/kg}$$

$$\frac{G_D}{G} = 0,1$$

$$r = 360 \text{ kcal/kg}$$

$$\eta = 0,31$$

Damit erhält man :

$$\frac{G}{[\text{kg/h}]} = 0,86 \cdot 10^6 \frac{N_{el}}{\eta (D_i + \frac{G_D}{G} r)} \approx 5,38 \cdot 10^4 \frac{N_{el}}{[\text{MW}]}$$

=====

3.3.14.8

Für Druckwasserreaktoren wurden folgende Werte verwendet :

$$\left. \begin{array}{l} \Delta t = 24,5^\circ\text{C} \\ c_p = 1,33 \text{ kcal/kg grd} \\ \eta = 0,31 \end{array} \right\} \Delta i = 32,6 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

Daraus ergibt sich :

$$\frac{G}{[\text{kg/h}]} = 0,86 \cdot 10^6 \frac{N_{el}}{\eta \Delta i} \approx 8,5 \cdot 10^4 \frac{N_{el}}{[\text{MW}]}$$

=====

3.3.14.9

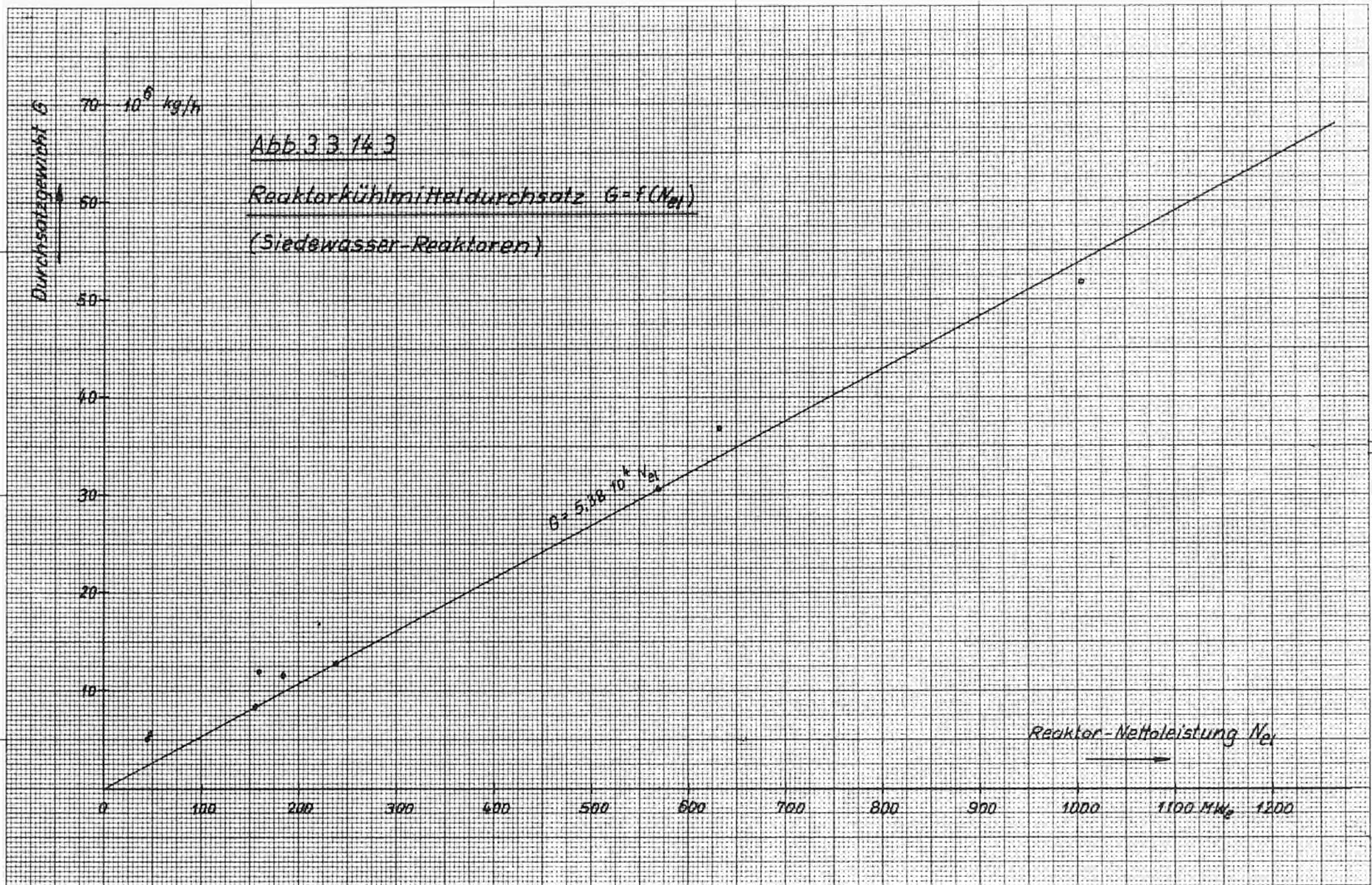
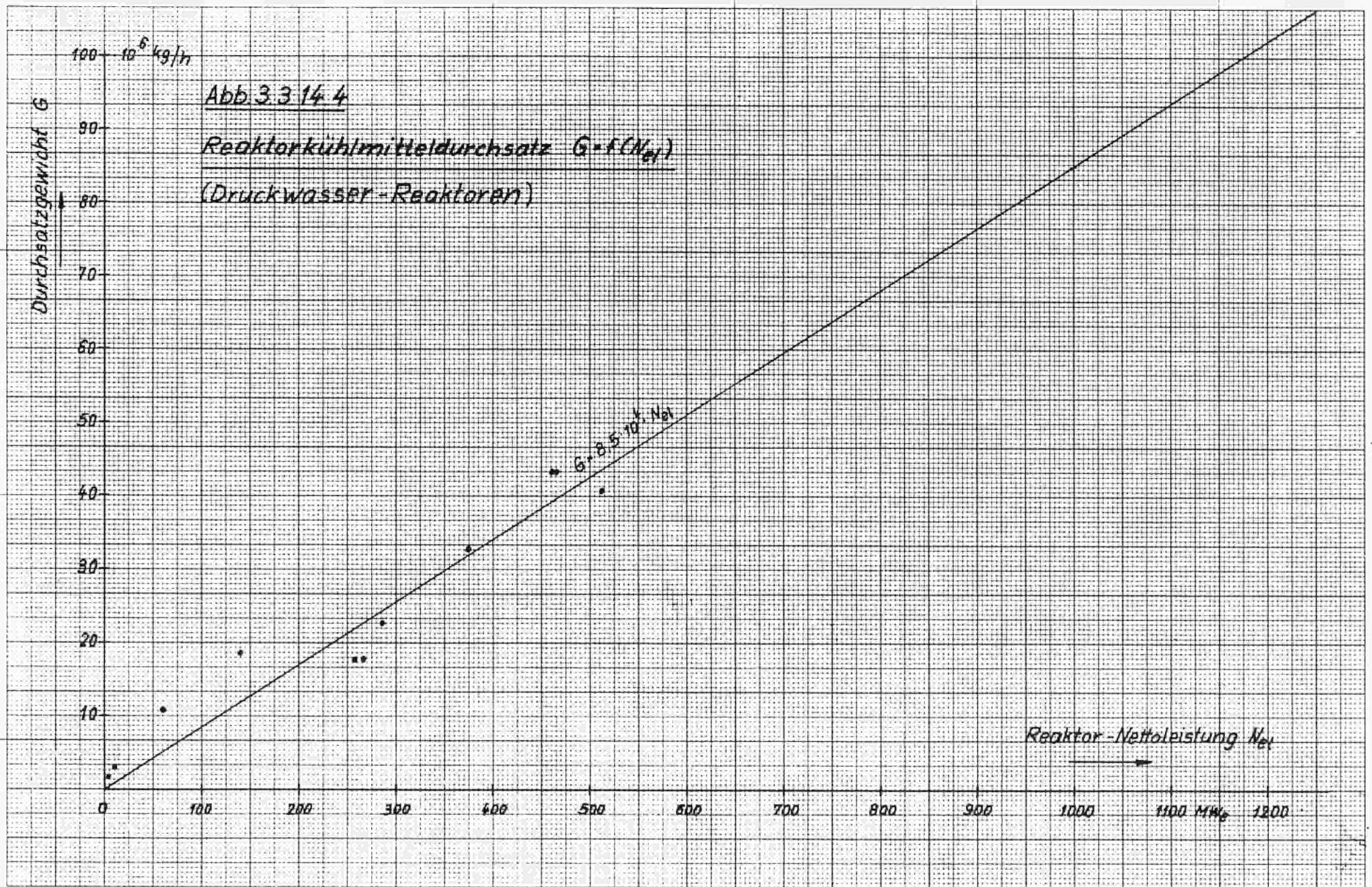


Abb. 3.3.14.3

Reaktorkühlmitteldurchsatz $G=f(N_{MW})$

(Siedewasser-Reaktoren)



3.3.1.4.1 Die Grenzgrößen des Einheitskühlkreislaufes und die Zahl der Kühlkreisläufe je Reaktor

Zur Vereinfachung der Konstruktion und zur Verbilligung der Anlagekosten wird die Verwendung von Einheitskühlkreisläufen angestrebt. Die Maximalleistung eines solchen Einheitskreislaufes ist durch verschiedene technische Bedingungen begrenzt.

Aus Festigkeitsgründen sollen die Durchbrüche am Druckgefäß nicht zu groß werden. Die lichten Durchmesser der Hauptkühlmittelleitungen werden aus diesem Grunde heute im allgemeinen nicht größer als 700 mm ausgeführt. Das Durchsatzgewicht ergibt sich mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung zu

$$G_K = \rho F \cdot w \quad 3.3.141.1$$

mit

G_K = Durchsatzgewicht je Kühlkreislauf

F = Querschnittsfläche der Hauptkühlmittelleitung

w = Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmittels

ρ = Dichte des Kühlmittels

Bei gegebener Querschnittsfläche der Kühlmittelleitung und durch den Zustand des Kühlmittels bestimmter Dichte ρ , ist das Durchsatzgewicht nur noch von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit wächst jedoch die Erosion. Über die Höhe der hinsichtlich der Erosion zulässigen Strömungsgeschwindigkeit herrscht noch keine Einigkeit.

Die AEG begrenzt die Strömungsgeschwindigkeit wegen der Erosionsgefahr auf $w = 6,5$ m/s, GE läßt noch 8 ... 10 m/s zu und Siemens hat wegen der Erosion keinerlei Bedenken. Dementsprechend treten bei den Druckwasserreaktoren dieser Firma Strömungsgeschwindigkeiten von 13 ... 14 m/s in der Hauptkühlmittelleitung auf.

Als leistungsbegrenzendes Element des Hauptkühlmittelkreislaufes eines Druckwasserreaktors wird von Siemens der Verdampfer angegeben (siehe Kap. 3.3.1.5.2).

Aufgrund der oben angeführten Einschränkungen ergeben sich als Maximal-Leistungen der Einheitskreisläufe oder Normschleifen

a) von Siedewasserreaktoren (AEG)

$$G_K \approx 6000 \text{ t/h} \quad \text{Durchsatzgewicht}$$

$$\text{bzw. } Q_K \approx 8000 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{Durchsatzvolumen;}$$

dem entspricht eine je Schleife übertragbare Leistung von :

$$N_K = 110 \dots 125 \text{ MW}_{e_{\text{netto}}}$$

$$(\text{GE: } N_K = 160 \dots 180 \text{ MW}_{e_{\text{netto}}})$$

b) von Druckwasserreaktoren (Siemens)

$$G_K \approx 13500 \text{ t/h} \quad \text{Durchsatzgewicht}$$

$$\text{bzw. } Q_K \approx 18000 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{Durchsatzvolumen;}$$

dem entspricht eine je Schleife übertragbare Leistung von :

$$N_K = 150 \dots 180 \dots 200 \text{ MW}_{e_{\text{netto}}}$$

Die Zahl der Normschleifen, die für einen Reaktor bestimmter Leistung erforderlich sind, ergibt sich damit zu

$$Z_K = \frac{G}{G_K} \quad 3.3.141.2$$

mit

$$Z_K = \text{Zahl der Normschleifen (auf ganze Zahlen aufgerundet)}$$

$$G = \text{Reaktorkühlmitteldurchsatz}$$

$$G_K = \text{Durchsatz der Normschleife}$$

oder näherungsweise

$$Z_K \approx \frac{N_{el}}{N_K} \quad 3.3.141.3$$

$$N_{el} = \text{Nettoreaktorleistung}$$

$$N_K = \text{Leistung je Normschleife}$$

Mit den oben angegebenen Daten einer Normschleife würde ein 1000 MW_e Kraftwerk folgende Anzahl von Kreisläufen benötigen

1) Siedewasserreaktor (AEG)

$$Z_K = 8 \quad \text{Kreisläufe}$$

2) Siedewasserreaktor (GE)

$$Z_K = 6 \quad \text{Kreisläufe}$$

3) Druckwasserreaktor (Siemens)

$$Z_K = 6 \quad \text{Kreisläufe}$$

Die Festlegung der Größe eines Einheitskreislaufes ist jedoch nicht nur ein technisches, sondern auch ein wirtschaftliches Problem.

Ob die technisch mögliche Maximalgröße auch mit der wirtschaftlich optimalen Größe eines Einheitskreislaufes übereinstimmt, müßte in einer Optimierungsrechnung festgestellt werden.

Zur Entwicklung ist zu sagen, daß die Gesamtumwälzmenge bei Siedewasserreaktoren um ca. 40% durch eine Erhöhung des Dampf- Wasser- Gewichtsverhältnisses von 0,1 auf 0,18^{*)} in absehbarer Zeit verringert werden kann.

*) siehe Fußnote Teil I, Seite 164

3.3.1.4.2 Anlagekosten, Grenzgrößen und Entwicklungstendenzen
der Umwälzpumpen

Die Anlagekosten der Umwälzpumpen sollen als Funktion des Durchsatzvolumens Q dargestellt werden.

$$K_P = K_{P_0} \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^m \quad 3.3.142.1$$

Nach Angaben der Firma KSB* sind die Kosten einer Pumpe in 1. Näherung ihrem Gewicht proportional. Das Gewicht steigt ungefähr proportional zu $Q^{0,5}$. Eine andere Angabe besagt, daß die Anlagekosten einer Pumpe sich bei Verdoppelung der Pumpenleistung um 50 ... 60% erhöhen.

Setzt man gleiche Förderhöhen voraus, dann ergibt sich aus diesen Angaben für den Degressionsexponenten

$$m = 0,5 \dots 0,68 \quad 3.3.142.2$$

Den folgenden Betrachtungen soll ein Degressionsexponent

$$m = 0,6$$

zugrunde gelegt werden.

Für die Anlagekosten der Pumpe eines Einheitskreislaufes liegen folgende Angaben vor

$$\text{Siedewasserreaktor: } K_{P_0} = 1,25 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$\text{bei } Q_0 = 8 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Druckwasserreaktor: } K_{P_0} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$\text{bei } Q_0 = 18 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Diese Werte sollen als Vergleichsgrößen für die Gleichung 3.3.142.1 betrachtet werden. Mit dem gewählten Degressionsexponenten erhält man:

$$K_P = K_{P_0} \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^{0,6} \quad 3.3.142.1a$$

und durch Einsetzen der Vergleichsgrößen für Umwälzpumpen von

*) KSB = Klein, Schanzlin und Becker

Siedewasserreaktoren

$$\frac{K_P}{[\text{DM}]} = 0,36 \cdot 10^6 \left(\frac{Q}{10^3 [\text{m}^3/\text{h}]} \right)^{0,6} \quad 3.3.142.3$$

=====

Druckwasserreaktoren

$$\frac{K_P}{[\text{DM}]} = 0,44 \cdot 10^6 \left(\frac{Q}{10^3 [\text{m}^3/\text{h}]} \right)^{0,6} \quad 3.3.142.4$$

=====

Der Verlauf der Kostenfunktion ist in Abb. 3.3.142.1 dargestellt.

Die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen werden noch in einem besonderem Kapitel untersucht.

Zum Abschluß dieses Kapitels nun noch einige Betrachtungen über die Probleme beim Bau großer Pumpen.

Zur Bewältigung großer Fördermengen bei mittleren Förderhöhen gibt es im Prinzip zwei Möglichkeiten

- a) Wahl einer mehrflutigen Radialpumpe mit einem relativ einfachen Laufrad und einem komplizierten Gehäuse.
- b) Wahl einer einflutigen Pumpe mit einer schnellläufigen Radform und einem einfachen, plattierbaren Gehäuse.

Bei den Umwälzpumpen des Siedewasserreaktor-Kraftwerkes der KRB hat man die erste der beiden Möglichkeiten gewählt und zweiflutige Pumpen installiert.

Zur Verhinderung von Korrosionserscheinungen müssen die mit dem Kühlmedium in Berührung kommenden Flächen aus korrosionsbeständigem Material bestehen. Da eine Plattierung der komplizierten Innenfläche eines doppel­flutigen Gehäuses nicht möglich ist, mußte das ganze Gehäuse aus einem korrosionsbeständigem Stahl (18/8 bzw. V2A) gegossen werden.

Wegen der notwendigen hohen Festigkeit des Gehäuses werden an die Gießtechnik hohe Anforderungen gestellt. Bei einem Fertiggewicht von 22t beträgt das Einsatzgewicht ca. 44t.

Die Größe des Gehäuses ist begrenzt durch dessen Wandstärke (bei KRB beträgt sie ca. 180 mm) und durch die Kapazität der Gießerei.

In dieser Beziehung können die KRB-Aggregate als obere Grenzgröße dieser Konstruktion betrachtet werden.

Für die nächsten Projekte sind einflutige Pumpen in der Entwicklung, zunächst für das Kernkraftwerk Lingen mit einer Fördermenge von $8000 \text{ m}^3/\text{h}$. Ziel der Entwicklung sind Aggregate mit Fördermengen von $15 \cdot 10^3 \dots 25 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ unter Verwendung schnellläufiger Radformen.

Die Gehäuse dieser einflutigen Aggregate werden aus warmfestem Stahl gegossen, die Innenflächen werden plattiert. Die Plattierung ist möglich, da die Gehäuseinnenflächen einfach geformt (im wesentlichen kugelförmig) und gut zugänglich sind.

Ein weiteres Problem ist die Wellendichtung. Absolut dichte Pumpen sind nur mit Spaltrohrmotoren zu verwirklichen. Diese Motoren arbeiten jedoch wegen des großen Spaltes zwischen Stator und Rotor unwirtschaftlich und sind außerdem teuer in der Anschaffung.

Die gebräuchlichen Gleitringdichtungen weisen bei einem Unfall hohe Leckagen auf und sind nicht ganz wartungsfrei. Speziell für Pumpen von Druckwasserreaktoren ist in jüngster Zeit eine berührungsfreie Spaltdichtung mit sehr geringer Leckage entwickelt worden. Die Spaltbreite wird bei dieser Dichtung durch den Systemdruck und die dynamischen Druckzustände in der Dichtung konstant gehalten. Es lassen sich auf diese Weise sehr kleine Spaltbreiten verwirklichen. Die Dichtung ist nahezu wartungsfrei.

Die Regelung der Durchflußmenge kann auf verschiedene Art und Weise erreicht werden:

1) Mechanische Regelung

- a) stufenlose Drehzahl-Regelung durch eine Flüssigkeitskupplung
- b) Regelung der Durchsatzmenge mit Hilfe verstellbarer Schaufeln (praktisch nur bei Propellerpumpen durchführbar)
- c) Regelung der Durchsatzmenge über eine Bypassleitung. Diese Regelung ist wegen zu hoher Verluste unwirtschaftlich. Ausserdem wäre das Regelorgan, der Bypass-Schieber, den Belastungen nicht gewachsen.

2) Elektrische Regelung

Diese Regelung besteht in allen Fällen in einer Drehzahlregelung. Sie kann erfolgen durch

- a) polumschaltbare Motoren (nicht stufenlos regelbar)
- b) frequenzgesteuerte Motoren
- c) Wechselstrommotoren mit Hintermaschinen
- d) Leonardsätze

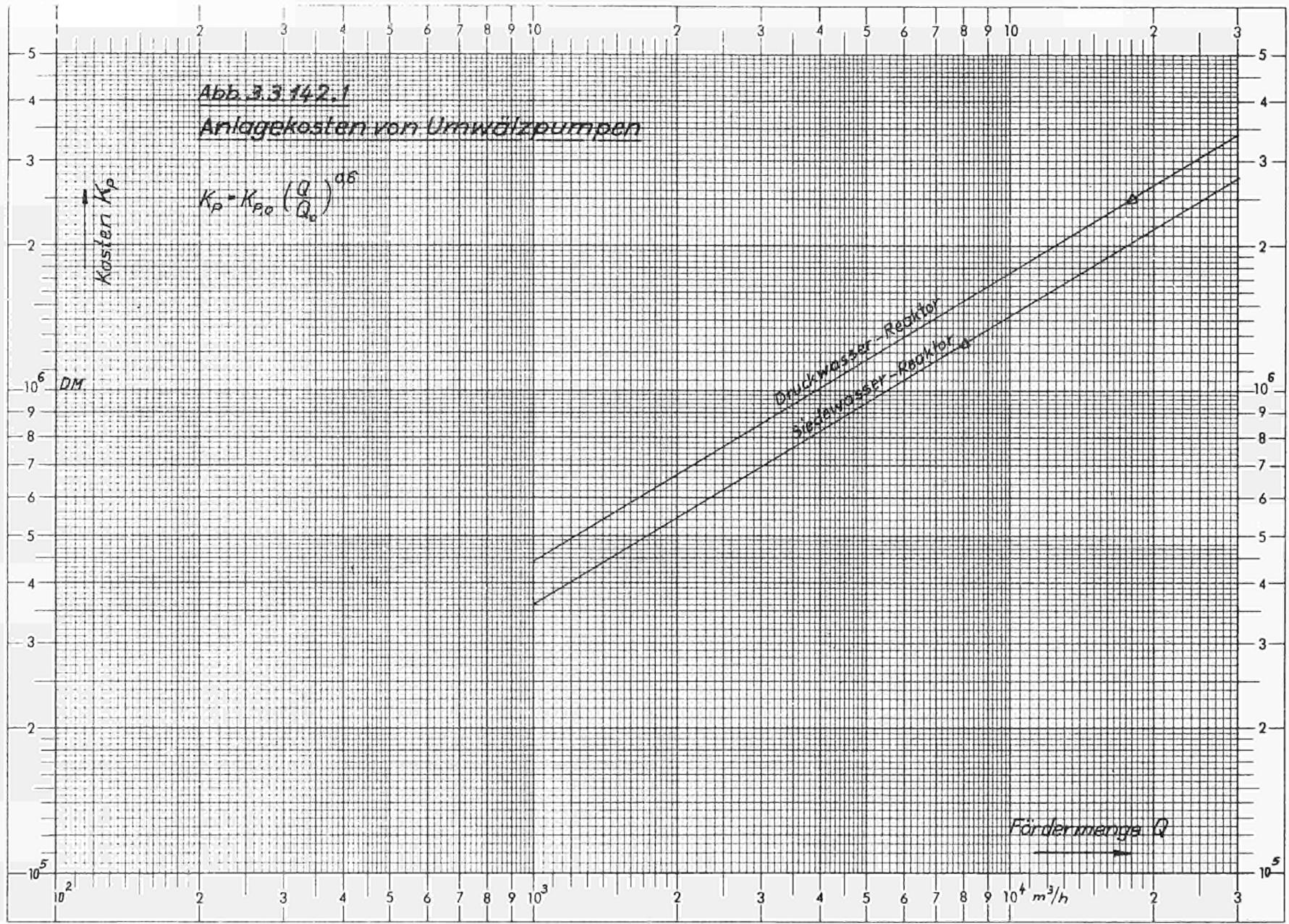
Die Regelung der Umwälzmenge ist besonders für Siedewasserreaktoren interessant, da hierdurch der mittlere Dampfblasengehalt im Kern und dadurch die Leistung des Reaktors ohne Steuerstabbewegung verändert werden kann. Diese Möglichkeit der Leistungsregelung wird bei neueren Reaktorkonzepten genutzt und zwar durch Einsatz frequenzgesteuerter Motore als Antrieb der Umwälzpumpen.

Die Umwälzpumpen von Druckwasserreaktoren werden mit konstanter Drehzahl betrieben. Regelbare Pumpen sind für die nähere Zukunft nicht vorgesehen.

Nach Berichten der GE ist der Einsatz von Wasserstrahlpumpen im Druckgefäßinneren vorgesehen. Durch diese Maßnahmen ließe sich die Zahl der äußeren Kühlkreisläufe erheblich verringern. Die Leistung der Pumpen der äußeren Kreisläufe müßte jedoch wesentlich vergrößert werden (in diesem Falle durch Vergrößerung der Förderhöhe). Wieweit die Wirtschaftlichkeit der Anlage durch diese Maßnahme verbessert werden kann, läßt sich noch nicht genau sagen. Es ist jedoch zu bedenken, daß zumindest die herkömmlichen Wasserstrahlpumpen einen schlechten Wirkungsgrad aufweisen.

Durch die Verwendung von Wasserstrahlpumpen ließe sich nach Angaben der GE^{*)} die Zahl der äußeren Kreisläufe einer 1000 MW_e-Anlage von 6 auf 2 verringern.

*) Siehe Teil I, Seite 164



3.3.1.5 Die Dampferzeuger

3.3.1.5.1 Die Anlagekosten der Dampferzeuger

Die Kosten der Dampferzeuger bzw. Wärmetauscher lassen sich als Funktion der Heizfläche darstellen

$$K = K_0 \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \quad 3.3.151.1$$

Wärmetauscher zur Dampferzeugung werden bei Druckwasserreaktoren und Zwei-Kreis-Siedewasserreaktoren benötigt.

Die erforderliche Heizfläche läßt sich näherungsweise aus folgender Beziehung ermitteln:

$$Q = k \cdot F \Delta t_m \quad 3.3.151.2$$

Darin ist

$$Q = \text{zu übertragende Wärmemenge} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$k = \text{Wärmedurchgangszahl} \quad \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{h grad}}$$

$$F = \text{Wärmeübertragungsfläche (Heizfläche)}$$

$$\Delta t_m = \text{Mittlere Temperaturdifferenz zwischen dem wärmeabgebenden und dem wärmeaufnehmenden Medium.}$$

Bei einem Wärmetauscher in dem ^{das} wärmeaufnehmende Medium verdampft, bleibt die Temperatur dieses Mediums konstant auf der dem Druck entsprechenden Siedetemperatur, wenn man annimmt, daß es mit Siedetemperatur in den Wärmetauscher eingespeist wird.

Die Temperatur des aus den Vorwärmern dem Verdampfer zuströmenden Kondensates liegt jedoch unterhalb der Siedetemperatur, so daß im Verdampfer zunächst eine weitere Erwärmung erfolgt. Die "Unterkühlung", des Kondensates ist aber in den meisten Fällen so gering, daß sie in dieser Betrachtung vernachlässigt werden kann.

Hat das wärmeaufnehmende Medium innerhalb des Verdampfers überall gleiche Temperatur, so gilt unabhängig von der Strömungsführung

$$\Delta t_m = \frac{t_e - t_a}{\ln \frac{t_e - t_s}{t_o - t_s}} \quad 3.3.151.3$$

- ϑ_e = Eintrittstemperatur des Primärmediums
 (Des wärmeabgebenden Mediums)
 ϑ_a = Austrittstemperatur des Primärmediums
 ϑ_s = Siedetemperatur des Sekundärmediums

Die Wärmedurchgangszahl k setzt sich aus der Wärmeübergangszahl α_1 zwischen Primärmedium und Heizfläche, dem Wärmedurchgang durch die Heizfläche $\frac{\delta}{\lambda}$ und der Wärmeübergangszahl α_2 zwischen Heizfläche und Sekundärmedium wie folgt zusammen

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad 3.3.151.4$$

Für die hier vorliegenden Verhältnisse - Wärmeübergang Wasser \rightarrow Metall \rightarrow siedendes Wasser - soll für die Wärmedurchgangszahl der Schätzwert

$$k = (1,5 \dots 2,5) \cdot 10^3 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{h grad}} \quad 3.3.151.5$$

eingeführt werden.

Aus der Gleichung 3.3.151.2 ergibt sich mit den oben definierten Größen als erforderliche Heizfläche:

$$F = \frac{Q}{k \Delta \vartheta_m} \quad 3.3.151.6$$

Ist Z_K die Zahl der Kühlkreisläufe je Reaktor und enthält jeder Kühlkreislauf einen Wärmetauscher (Verdampfer), dann erhält man folgenden Zusammenhang zwischen der Wärmeleistung Q eines Wärmetauschers und der Reaktorleistung N

$$\frac{Q}{[\text{Kcal/h}]} = 0,86 \cdot 10^6 \frac{N_{el}}{[\text{MW}]} \cdot \frac{1}{Z_K \eta} = 0,86 \cdot 10^6 \frac{N_{th}}{[\text{MW}]} \cdot \frac{1}{Z_K} \quad 3.3.151.7$$

Zur näherungsweisen Bestimmung des Degressionsexponenten m können Angaben aus dem chemischen Apparatebau ¹⁾ herangezogen werden.

¹⁾ H.Kölbel, J.Schulze: " Projektierung und Vorkalkulation in der chemischen Industrie " /S. 305 Abb. 178 /Springer -Berlin- 1960

Anhand dieser Angaben wurde für einen U-Rohr-Wärmetauscher, wie er im Reaktorbau verwendet wird, ein Degressionsexponent

$$m = 0,72 \dots 0,75 \qquad 3.3.151.8$$

=====

geschätzt.

Als Bezugskosten sollen die Kosten der U-Rohr-Verdampfer einer 500 MW_e-Druckwasser-Reaktor-Anlage mit folgenden technischen Daten herangezogen werden:

Reaktorwärmeleistung	$N_{th} = 1650 \text{ MW}$
Zahl der Kühlkreisläufe	$Z_K = 3$
= Zahl der Verdampfer	

Primärsystem

Temperatur des Kühlwassers am Austrittsstutzen des Reaktors =
Eintrittstemperatur des Primärmediums in den Verdampfer

$$t_e = 311,4^\circ\text{C}$$

Temperatur des Kühlwassers am Eintrittsstutzen des Reaktors =
Austrittstemperatur des Primärmediums aus dem Verdampfer

$$t_a = 284,6^\circ\text{C}$$

Sekundärsystem

Druck $p = 50 \text{ at}$
Siedetemperatur $t_s = 262,7^\circ\text{C}$
Geschätzte Anlagekosten je Verdampfer:

$$K = 4 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

=====

Aus den technischen Daten ergibt sich:
Die mittlere Temperaturdifferenz

$$\Delta t_m = \frac{311,4 - 284,6}{\ln \frac{311,4 - 262,7}{284,6 - 262,7}} = 32,2^\circ\text{C}$$

Die je Verdampfer zu übertragende Wärmeleistung

$$Q = 0,86 \cdot 10^6 \cdot \frac{1650}{3} = 4,73 \cdot 10^8 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Die Heizfläche je Verdampfer

$$F = \frac{4,73 \cdot 10^8}{2,5 \cdot 10^3 \cdot 32,2} = 5,876 \cdot 10^3 = 6 \cdot 10^3 \text{ m}^2$$

=====

Mit einem angenommenen Degressionsexponenten von

$$m = 0,75$$

=====

ergibt sich aus Gleichung 3.3.151.1 folgende Kostenrelation für die U-Rohr-Verdampfer von Druckwasserreaktoren mit einem Auslegungsdruck von ca. 165 atü

$$K_w = 4 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{F}{6 \cdot 10^3} \right)^{0,75}$$

$$\frac{K_w}{[\text{DM}]} = 1,04 \cdot 10^6 \left(\frac{F}{[\text{m}^2]} \cdot 10^{-3} \right)^{0,75}$$

3.3.151.9

=====

Allgemein kann die Kostenfunktion für U-Rohr-Wärmetauscher dieser Größenordnung in Form der Gleichung 3.3.151.1

$$K_w = K_{w_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{0,75} \quad 3.3.151.10$$

=====

mit

K_{w_0} = Anlagekosten des Vergleichswärmetauschers

F_0 = Heizfläche des Vergleichswärmetauschers

geschrieben werden.

Im Diagramm Abb. 3.3.151.1 sind die geschätzten Anlagekosten für Wärmetauscher (Verdampfer) von Druckwasserreaktor-Anlagen nach Gl. 3.3.151.9 dargestellt. (Kurve p = 165 atü)

Für Zweikreis-Siedewasserreaktoren mit einem Auslegungsdruck von $p = 88 \text{ atü}$ ergibt sich die Kostenfunktion der Wärmetauscher (Verdampfer) aus folgender Abschätzung:

Größe der Anlage :	250 MWe
Anzahl der Kreisläufe :	3
Leistung je Kreislauf :	82 MW _{th}
mittlere Temperaturdifferenz :	$\Delta t_m = 38^\circ\text{C}$
geschätzte Wärmedurchgangszahl :	$k = 1700 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\text{h grad}}$
geschätzte Kosten	$K_W = 1 \cdot 10^6 \text{ DM}$
geschätzter Degressionsexponent	$m = 0,72$

Die Größe der Verdampfungsfläche ergibt sich daraus zu:

$$F = \frac{Q}{k \Delta t_m} = \frac{0,86 \cdot 82 \cdot 10^6}{1,7 \cdot 10^3 \cdot 38} = 1100 \text{ m}^2$$

Kostenfunktion:

$$K_W = 1 \cdot 10^6 \left(\frac{F}{1,1 \cdot 10^3} \right)^{0,72}$$

$$\frac{K_W}{[\text{DM}]} = 0,934 \left(\frac{F}{[\text{m}^2]} \cdot 10^{-3} \right)^{0,72} \quad 3.3.151.11$$

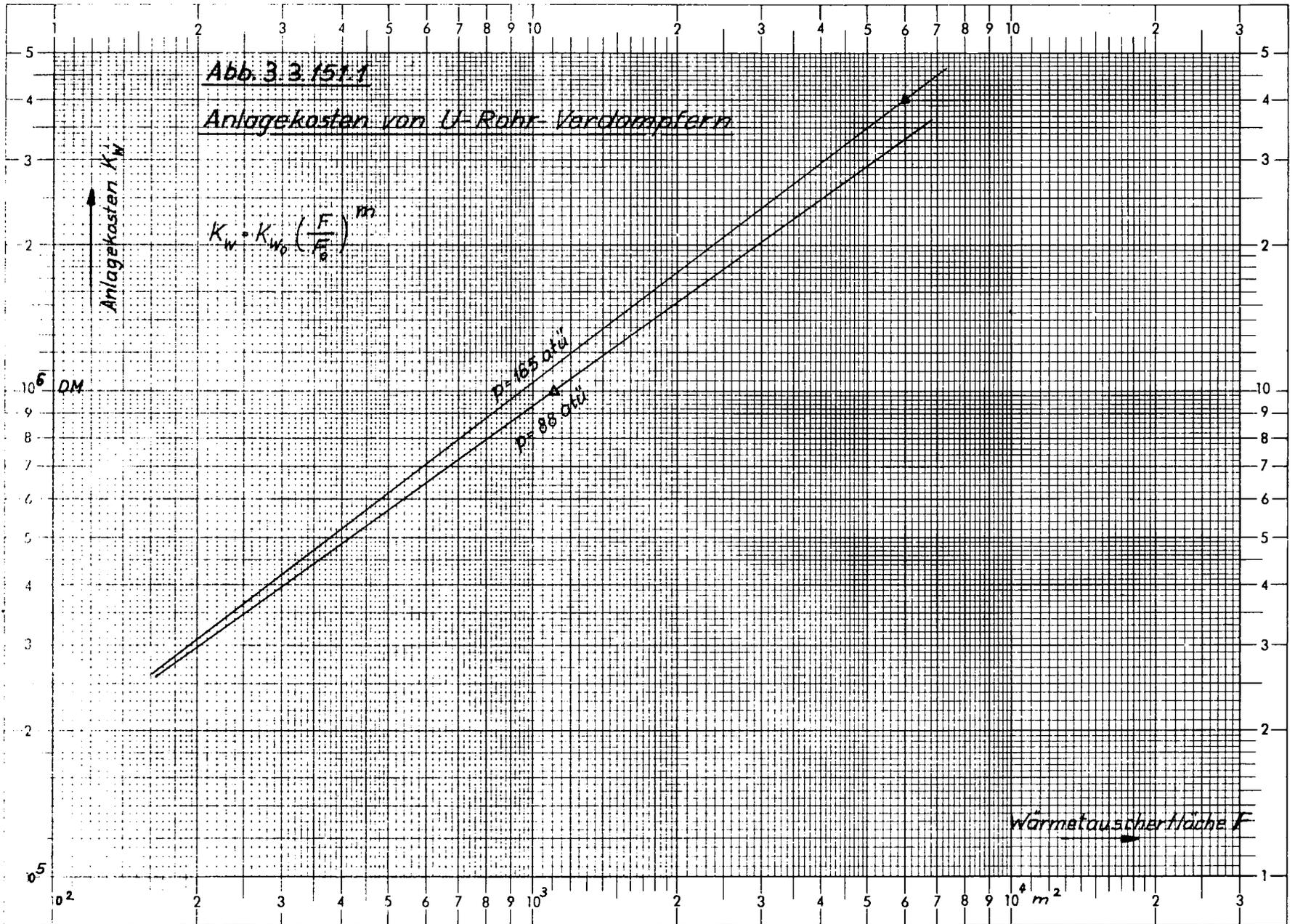
=====

bzw. allgemein :

$$K_W = K_{W_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{0,72} \quad 3.3.151.12$$

=====

Die nach Formel 3.3.151.11 geschätzten Anlagekosten der Verdampfer sind im Diagramm Abb. 3.3.151.1 (Kurve $p = 88 \text{ atü}$) dargestellt.



3.3.1.5.2 Begrenzungen der Dampferzeugergröße

Die Größe eines Rohrbodenwärmetauschers ist durch die maximale Länge der nahtlosen Rohre und durch die maximal mögliche Größe eines Rohrbodens begrenzt.

Nahtlose Rohre des verwendeten Durchmessers werden bis zu einer Länge von 20 m hergestellt. Eine Vergrößerung der Heizfläche ist nur noch durch Vergrößerung der Rohrzahl je Wärmetauscher, also durch Vergrößerung des Rohrbodendurchmessers möglich; eine Möglichkeit, die auch nicht unbegrenzt nutzbar ist, da die Rohrbodendicke s bei sonst gleichen Bedingungen proportional mit dem Durchmesser D wächst

$$s = cD \sqrt{\frac{p}{K/S \cdot \nu}} \quad *) \quad 3.3.152.1$$

mit

s = Rohrbodendicke

c = Konstante

D = Rohrbodendurchmesser

p = Auslegungsdruck

K = Materialkennwert

S = Sicherheitsbeiwert

$\nu = \frac{t - d}{t}$ = Verschwächungsbeiwert

t = Rohrteilung

d = Rohraußendurchmesser

Eine zu große Dicke s des Rohrbodens ist aus Wärmespannungsgründen nicht erwünscht und auch fertigungstechnisch nicht immer sicher zu beherrschen. Nach Ansicht deutscher Firmen ist es jedoch beim heutigen Stand der Schweiß- und Prüftechnik durchaus möglich, geschweißte Rohre für den Wärmetauscher zu verwenden, so daß eine Bindung an die Fabrikationslänge der Rohre entfällt.

*) nach Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau Seite 401

A. P. FRAAS, M. N. OZISIK "Heat Exchanger Design" Seite 117

(I. Wiley and Sons Inc., New York 65)

Im Zusammenhang mit der Verwendung von Einheitskreisläufen wäre es erforderlich, die optimale Größe eines Wärmetauschers zu ermitteln. Bei den modernen Druckwasser - Reaktor - Konstruktionen werden 150...180 MW_{el} je Kreislauf übertragen. Dem entsprechen etwa 480...580 MW_{th}. Bei einer Aufwärmspanne von 27...28 °C und einer spezifischen Wärme von $c_p = 1,3$ kcal/kg·grd. ist dazu ein Durchsatz von $G = (1,1 \cdot 10^4 \dots 1,4 \cdot 10^4)$ t/h notwendig.

3.3.1.6 Die Anlagekosten des Druckhaltesystems

Für die Kosten des Druckhaltesystems liegen keine Werte vor. Zur ungefähren Abschätzung werden daher Angaben aus der amerikanischen Literatur ¹⁾ übernommen.

In Abhängigkeit von der Reaktorleistung ergibt sich folgende Kostenfunktion

$$K = K_0 \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,45} \quad 3.3.16.1$$

wobei als Vergleichsanlage eine Anlage mit den Daten

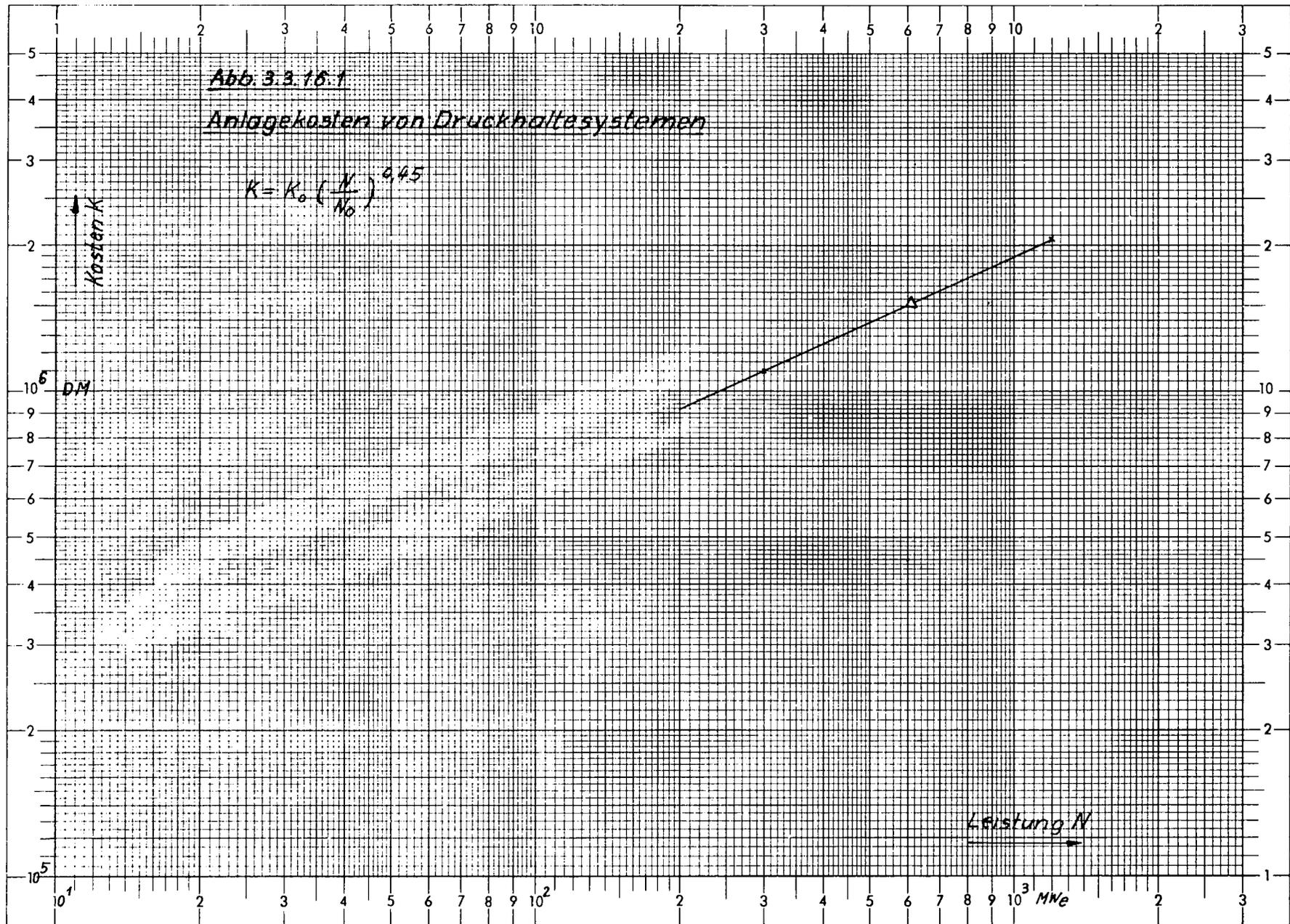
$$K_0 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

betrachtet werden soll.

Der Verlauf der Anlagekosten entsprechend der Gleichung 3.3.16.1 ist in Abb. 3.3.16.1 dargestellt

¹⁾TID 7025 / 327 - 2



3.3.1.7 Die Kosten der elektrotechnischen Ausrüstung des nuklearen Dampferzeugersystems

Unter der elektrotechnischen Ausrüstung des nuklearen Dampferzeugersystems werden die elektrischen Antriebe der Pumpen und Armaturen dieses Systems, sowie das gesamte Zubehör an Leitungen, Schalteinrichtungen usw. verstanden.

Der weitaus größte Teil der Kosten dieser Ausrüstung entfällt auf die Umwälzkreisläufe. Setzt man die Verwendung von Einheitskreisläufen voraus, so erhöht sich mit wachsender Reaktorleistung lediglich die Zahl der Kreisläufe, nicht aber die Größe (Leistung) der einzelnen Kreisläufe.

Die Kosten eines Einheitskreislaufes können also als unabhängig von der Reaktorleistung angenommen werden, wenn man von einer Veränderung der Kosten durch die Anfertigung einer mehr oder weniger großen Zahl gleicher Aggregate einmal absieht.

In Anbetracht der Tatsache, daß der größte Teil der Kosten der elektrotechnischen Ausrüstung auf die Umwälzkreisläufe entfällt, ist es gerechtfertigt die gesamten Kosten der elektrotechnischen Ausrüstung des nuklearen Dampferzeugersystems gleichmäßig auf die einzelnen Kreisläufe zu verteilen.

Für eine 600 MW_e-Siedewasserreaktor-Anlage mit 5 Einheitskreisläufen werden die Kosten der elektrotechnischen Ausrüstung des nuklearen Dampferzeugersystems auf ca. $10 \cdot 10^6$ DM geschätzt. Die Kosten je Einheitskreislauf betragen dann

$$K_{EN,K} = 2 \cdot 10^6 \text{ DM} / \text{Einheitskreislauf} \quad 3.3.17.1$$

Die entsprechenden Kosten einer 500 MW_e-Druckwasserreaktor-Anlage mit 3 Einheitskreisläufen werden auf ca. $18 \cdot 10^6$ DM geschätzt. Die Kosten je Einheitskreislauf ergeben sich dann zu

$$K_{EN,K} = 6 \cdot 10^6 \text{ DM} / \text{Einheitskreislauf} \quad 3.3.17.2$$

Die wesentlich höheren Kosten je Einheitskreislauf sind durch die größeren Antriebsleistungen bei den Druckwasserreaktor-Umwälzpumpen bedingt. Eine Übersicht über die Motorleistung der Umwälzaggregate einiger ausgeführter bzw. geplanter Kernkraftwerke geben die Tabellen 3.3.17.1 und 2.

In der jeweils letzten Zeile dieser Tabellen sind die Daten der den Kostenschätzungen zugrunde gelegten Anlagen angegeben. Aus den Motorleistungen dieser Anlagen und einem geschätzten Degressions-exponenten $m = 0,7$ ergibt sich das Verhältnis der Kosten zu

$$\frac{K_{EN,PWR}}{K_{EN,BWR}} \approx \left(\frac{N_{M,PWR}}{N_{M,BWR}} \right)^{0,7} = \left(\frac{5000kW}{1000kW} \right)^{0,7} \approx 3,1$$

Dieses Verhältnis stimmt mit dem Verhältnis der geschätzten Kosten gut überein.

Daten über Kühlmittelpumpen und -Antriebe von Siedewasserreaktoren

Anlage	Zahl der Schleifen/ Pumpen	Förderhöhe [m]	Fördermenge je Pumpe [m ³ /h]	Material der Pumpe			Motorleistung [kW]	Höhe/ Durchmesser [m]
				Rad	Welle	Gehäuse		
Big Rock Point	2/2	23	3630	304ss	304ss	316ss	298,2	3,8 1,83
Dairyland	2/2	26	3400	304ss	A - 276 Type 410	A - 217 C - 5	298,2	2,75 1,37
KRB	3/3	43,6	5680	304ss CF 8ss	Chromplatt. geschmiedeter Stahl	ASTM-A-351 CF 8ss	1043,7	3,97 2,75
Nine Mile Point	5/5	36,6	8170	304ss	304ss	316ss	745,5	5,77 1,84
Oyster Creek	5/5	38,1	7260	304ss	304ss	316ss	745,5	5,77 1,84
Pathfinder	3/3	21,7	4540	304ss	304ss	Cast 304ss	298,2	4,68 1,84
Tarapur 1	2/2	50,3	7400	304ss	304ss	316ss	1118,3	4,88 1,83
" 2	2/2	50,3	7400	304ss	304ss	316ss	1118,3	4,88 1,83
KWL	2/2	35,1	8107 8000				894,6	
AEG - 600	5/5	30	8000				1000	

Daten über Kühlmittelpumpen und -Antriebe von Druckwasserreaktoren

Anlage	Zahl der Schleifen/ Pumpen	Fördermenge je Pumpe [m ³ /h]	Förder- höhe [m]	Material der Pumpe			Motorleistung [kW]	Höhe/ Durch- messer [m]
				Rad	Welle	Gehäuse		
Con. Yankee	4/4	14050	73,20	304ss	304ss	316ss	2982	7,78 1,83
Malibu	4/4	14050	73,20				2982	
San Onofre	3/3	14870	68,60	304ss	304ss	316ss	2982	7,78 1,83
KBWP	2/2	14440	65,30	ss	ss	C-Stahl plattiert	3500	4,50 2,44
Zorita	1/1	16340	61,00	304ss	304ss	316ss		
SSW - 513	3/3	18000	80				5 000	

Tab. 3.3.17.2

Nucleonics 23(1965) 2 Febr. S. 54/55

3.3.1.8 Die Kosten der Instrumentierung des nuklearen
Dampferzeugersystems

3.3.1.8.1 Die Kosten der Instrumentierung bei Siedewasserreaktoren

Die Kosten der Instrumentierung des nuklearen Dampferzeugersystems einer 600 MW_e - Siedewasser-Reaktoranlage betragen nach Angaben der AEG etwa 3,3 % der gesamten direkten Anlagekosten. Mit den dieser Studie zugrunde gelegten Referenzkosten von 276 · 10⁶ DM für eine 600 MW_e - Anlage ergibt sich

$$K_{I,R} = 0,033 \cdot 276 \cdot 10^6 \approx 9,1 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Aus Angaben der AEG*) zur Instrumentierung einer 250 MW_e - Anlage lassen sich die Kosten der Instrumentierung des nuklearen Dampferzeugungssystems auf ca.

$$K_{I,R} \approx 6 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

schätzen.

Nimmt man einen linearen Abfall im doppeltlogarithmischen Netz an, dann ergibt sich als Degressionsexponent

$$m = \frac{\lg \frac{9,1}{6}}{\lg \frac{600}{250}} = \frac{\lg 1,517}{\lg 2,4} = \frac{0,18099}{0,38021} = 0,476$$

$$m \approx 0,48$$

=====

Zur Extrapolation auf größere Leistungen wurde der Kostenverlauf mit dem Exponenten $m = 0,48$ in einem linearen Netz dargestellt (Abb. 3.3.18.1) und unter der Annahme, daß die Kosten von ca. 600 MW_e linear steigen, durch eine Gerade angenähert. Die Gleichung dieser Geraden lautet:

$$\frac{K_{I,R}}{[\text{DM}]} = 6,5 \cdot 10^3 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 5,2 \cdot 10^6 \quad 3.3.181.1$$

für $N \geq 600 \text{ MW}_e$

Die Darstellung im doppelt-logarithmischen Netz kann dann durch folgende Gleichungen wiedergegeben werden:

*) lt. privater Mitteilung

$$K_{I,R} = K_{I,R_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.181.2$$

mit

$$\begin{aligned} m &= 0,48 && \text{im Bereich} \\ K_{I,R_0} &= 9,1 \cdot 10^6 \text{ DM} && 300 \text{ MW}_e \leq N \leq 900 \text{ MW}_e \\ N_0 &= 600 \text{ MW}_e \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} m &= 0,56 \\ K_{I,R_0} &= 11,06 \cdot 10^6 \text{ DM} && 300 \text{ MW}_e \leq N \\ N_0 &= 900 \text{ MW}_e \end{aligned}$$

In Abb. 3.3.181.1 ist der Kostenverlauf im doppelt-logarithmischen Netz dargestellt.

In diesen Kosten sind die Kosten für eine "Incore-Instrumentierung" enthalten.

Abb.: 3.3.18.1

Kosten der Instrumentierung

$K_{I,R}$

10 $\cdot 10^6$ DM

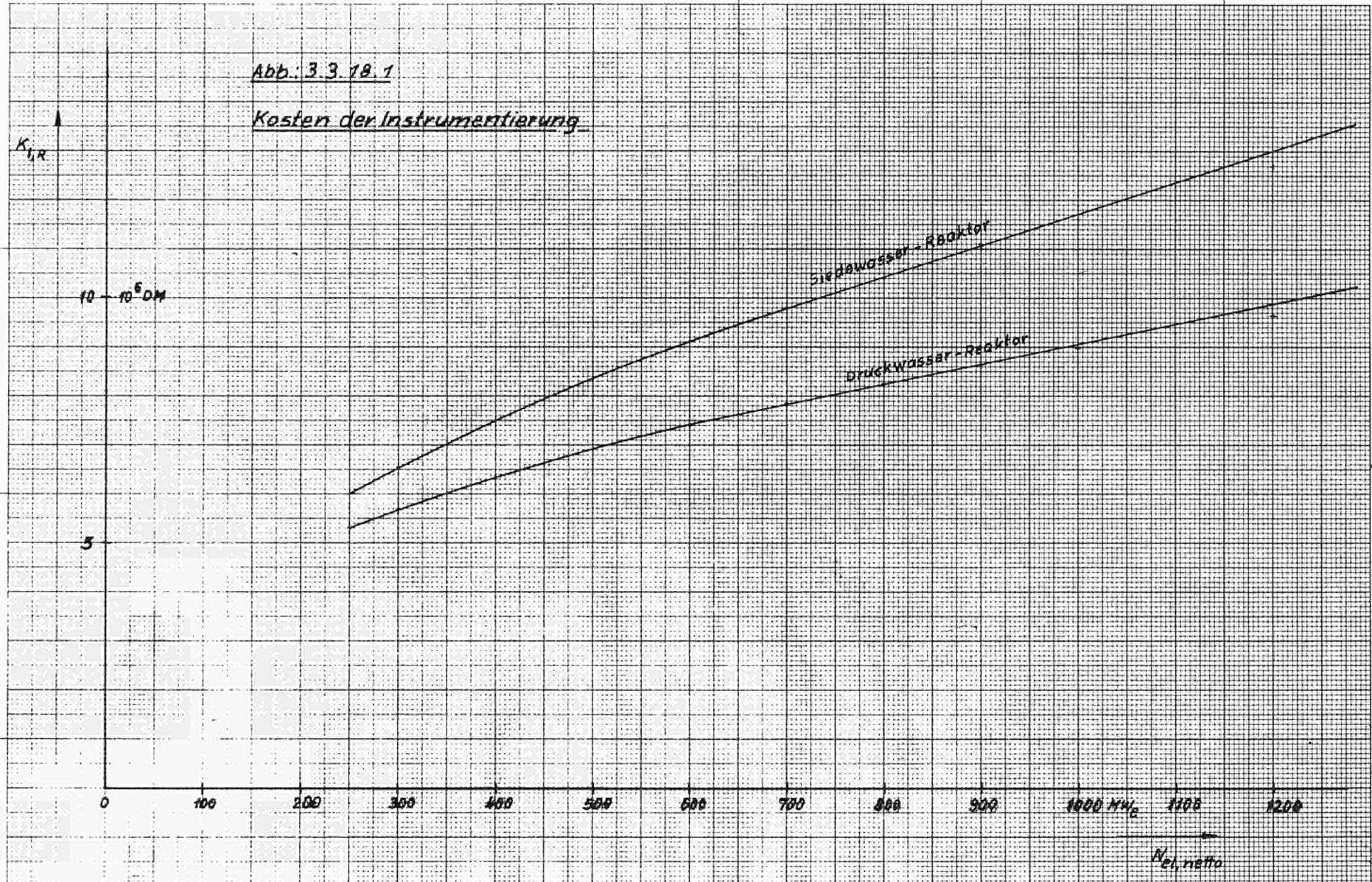
5

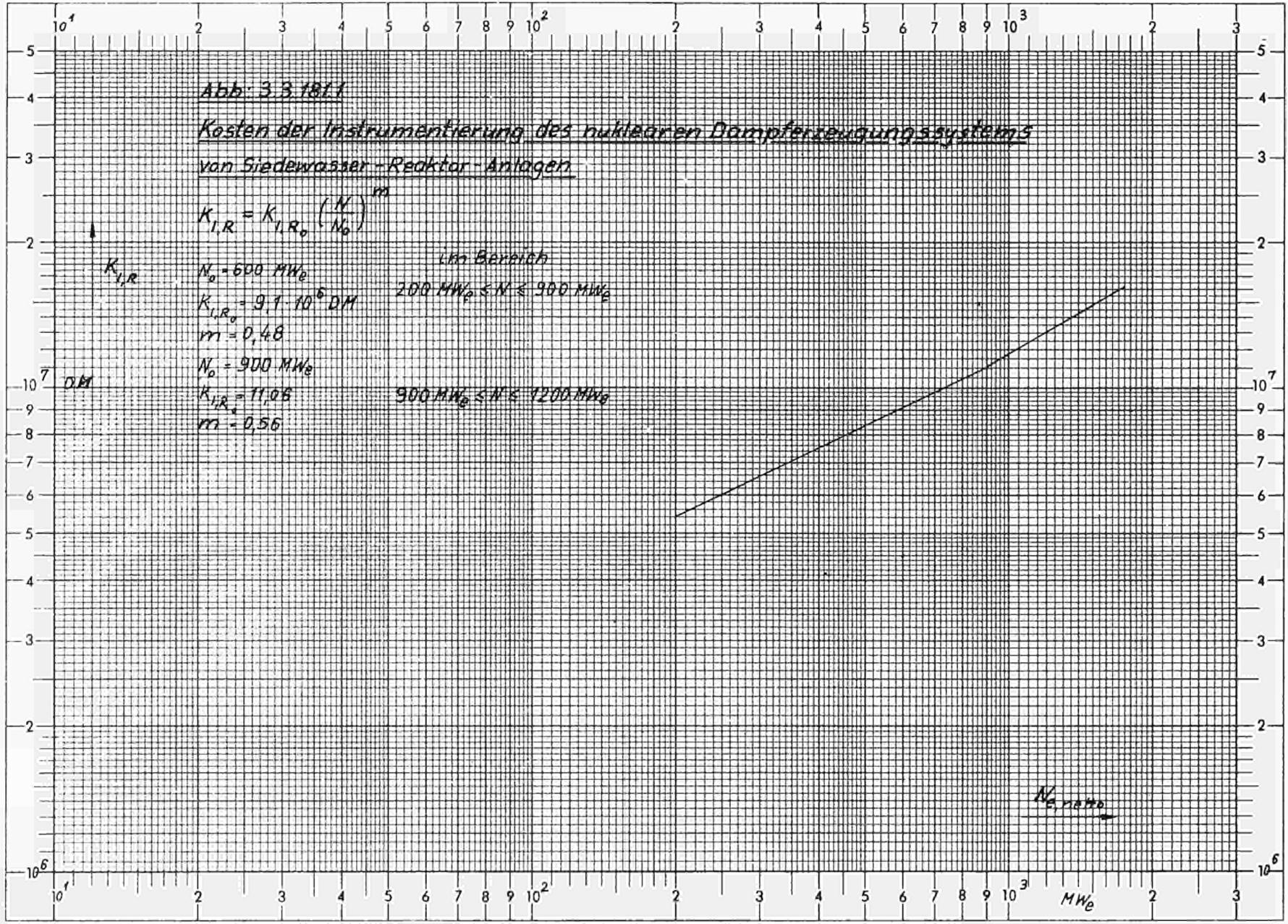
Siedewasser-Reaktor

Druckwasser-Reaktor

0 100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 MW_e 1100 1200

Net, netto





3.3.1.8.2 Die Kosten der Instrumentierung bei Druckwasserreaktoren

Da uns zur Zeit keine genauen Angaben über die Kosten der Instrumentierung des nuklearen Dampferzeugersystems von Druckwasser-Reaktor-Anlagen zur Verfügung stehen, sollen die Kosten anhand der Kostendaten für Siedewasser-Reaktor-Anlagen geschätzt werden. Nach Angaben von Siemens ist bei den Druckwasser-Reaktor-Anlagen dieser Firma keine "Incore-Instrumentierung" vorgesehen. Im folgenden wird angenommen, daß die Kosten der Instrumentierung von Druckwasser-Reaktoren gleich den Kosten der Instrumentierung von Siedewasser-Reaktoren abzüglich der Kosten für die "Incore-Instrumentierung" sind.

Aus den Angaben der AEG zur Instrumentierung einer 250 MW_e - Siedewasser-Reaktor-Anlage lassen sich die Kosten der "Incore-Instrumentierung" auf

$$K_{\text{Incore},250} \approx 0,7 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad 3.3.182.1$$

schätzen.

Nimmt man an, daß die Kosten der Incore-Instrumentierung proportional zur Kernfläche wachsen, dann ergibt sich unter Beachtung der Gleichung 3.3.111.2

$$K_{\text{Incore},N} \sim F_{K,N} \sim d_N^2 \sim N_{e,\text{netto}} \quad 3.3.182.2$$

mit

$K_{\text{Incore},N}$ = Kosten der Incore-Instrumentierung einer Anlage mit der elektrischen Nettoleistung N

$F_{K,N}$ = Kernquerschnittsfläche einer Anlage mit der elektrischen Nettoleistung N

d_N = Kerndurchmesser einer Anlage mit der elektrischen Nettoleistung N

$N_{e,\text{netto}}$ = elektrische Nettoleistung

In erster Näherung kann man also sagen

$$\frac{K_{\text{Incore},N}}{K_{\text{Incore},N_0}} = \frac{N_{e,\text{netto}}}{N_{0,e,\text{netto}}} \quad 3.3.182.3$$

Mit Gleichung 3.3.182.1 ergibt sich für eine 600 MW_e-Anlage

$$K_{\text{Incore},600} = K_{\text{Incore},250} \frac{600}{250} = 0,7 \cdot 10^6 \cdot 2,4 = 1,68 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$K_{\text{Incore},600} \approx 1,7 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad 3.3.182.4$$

Als Kosten der Instrumentierung des nuklearen Dampferzeuger-Systems einer Druckwasser-Reaktor-Anlage ergeben sich unter den oben getroffenen Annahmen für eine Leistung von

$$N_{e,\text{netto}} = 250 \text{ MW}_e$$

$$K_{\text{I,R}} = 6 \cdot 10^6 - 0,7 \cdot 10^6 = 5,3 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$N_{e,\text{netto}} = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{\text{I,R}} = 9,1 \cdot 10^6 - 1,7 \cdot 10^6 = 7,4 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Nimmt man einen linearen Kostenanstieg im logarithmischen Netz zwischen diesen beiden Punkten an, dann ergibt sich ein Degressions-exponent

$$m = \frac{\lg \frac{7,4}{5,3}}{\lg \frac{600}{250}} = \frac{0,14489}{0,38021} = 0,381$$

$$m \approx 0,38$$

=====

Die Extrapolation auf größere Leistungen erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie in Abschn. 3.3.1.8.1. Für die Gerade im linearen Netz ergibt sich die Gleichung

$$\frac{K_{\text{I,R}}}{[\text{DM}]} = 4,08 \cdot 10^3 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 4,95 \cdot 10^6 \quad 3.3.182.5$$

für $N \geq 600 \text{ MW}_e$.

In der Exponential-Darstellung läßt sich der Kostenverlauf durch die Gleichungen

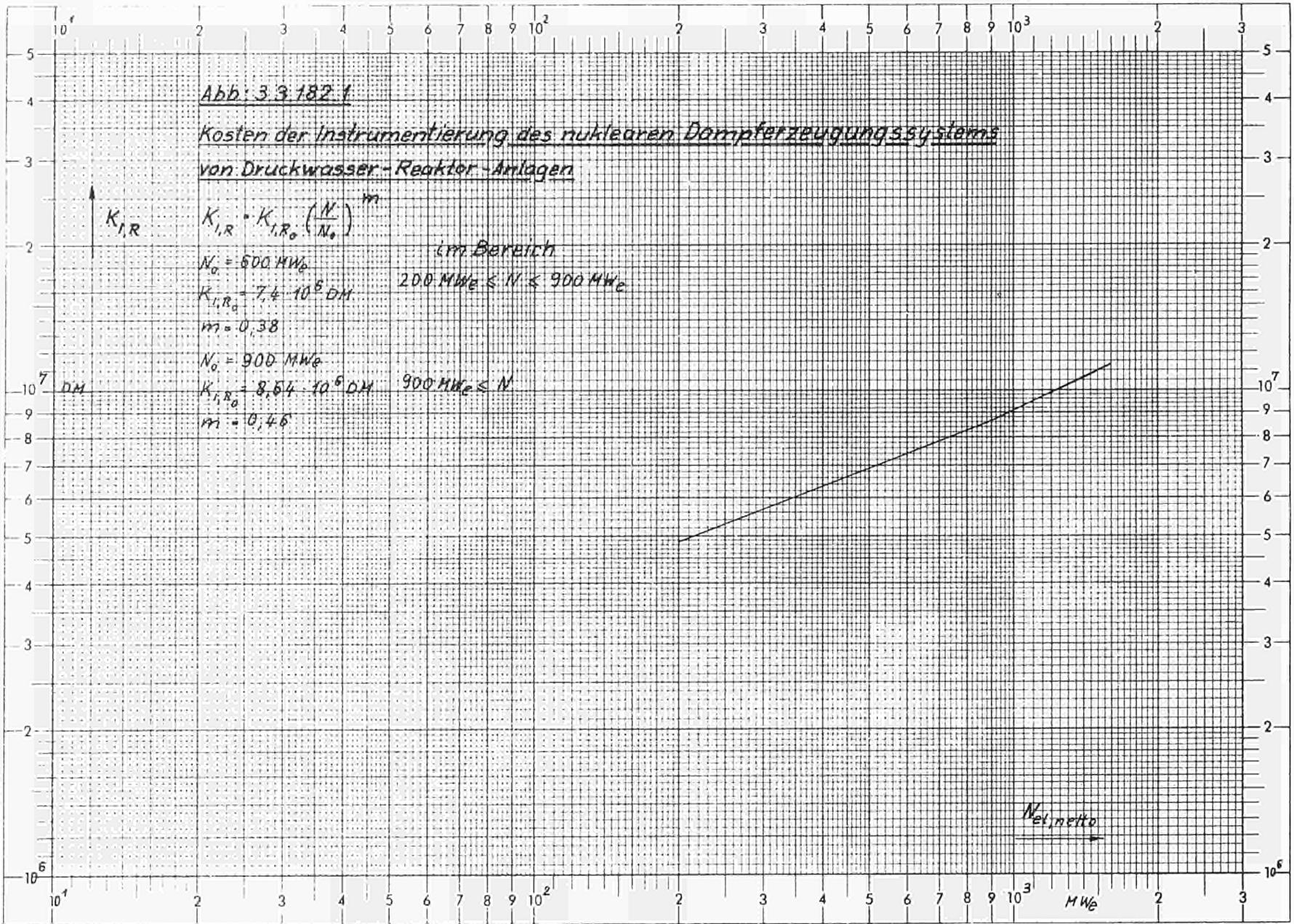
$$K_{\text{I,R}} = K_{\text{I,R}_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.182.6$$

mit

$$m = 0,38$$

$$K_{\text{I,R}_0} = 7,4 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{im Bereich}$$

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e \quad 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 900 \text{ MW}_e$$



und

$$\begin{array}{lll} m & = & 0,46 \\ K_{I,R_0} & = & 8,64 \cdot 10^6 \text{ DM} \\ N_0 & = & 900 \text{ MW}_e \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{im Bereich} \\ 900 \leq N \end{array}$$

wiedergeben.

Im Diagramm Abb. 3.3.182.1 ist der Kostenverlauf graphisch dargestellt.

3.3.1.9 Die Kosten des Systems für Wasserchemie und Volumenregelung

Dieses Primärwasser-Aufbereitungssystem gehört eigentlich zu den Reaktorhilfssystemen, soll im Rahmen dieser Studie jedoch gesondert betrachtet werden, da es das für den fortgeschnittenen Druckwasserreaktor typische Borsäure-Regelungssystem enthält.

Das System für Wasserchemie und Volumenregelung umfaßt die Einrichtungen zur Regelung der Borsäure- und Korrosionsinhibitoren-Konzentration, der Kühlmittelvolumenregelung sowie der Primärwasserreinigung.

Die Kosten dieses Systems betragen nach Angaben von Herstellerfirmen ca. 0,4...0,5 Prozent der direkten Anlagekosten.

$$K_{C,V} = (0,004 \dots 0,005) 276 \cdot 10^6 = 1,104 \cdot 10^6 \dots 1,38 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Die Kosten des Systems für eine 600 MW_e-Anlage werden als folgenden zu

$$K_{C,V} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

angenommen.

Als Degressionsexponent wird für den Bereich

$$200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1000 \text{ MW}_e$$

der Wert

$$m = 0,7$$

geschätzt.

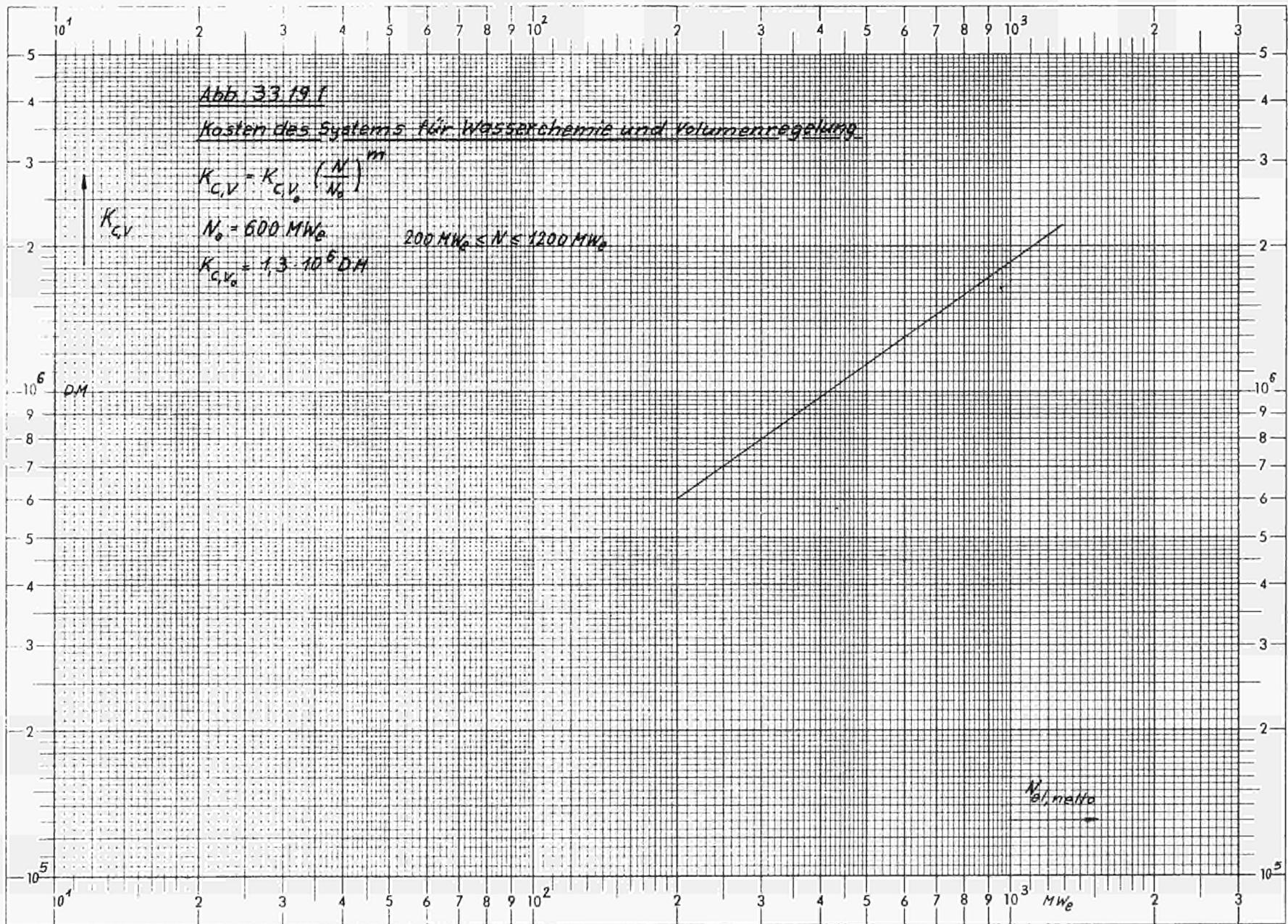
Damit ergibt sich folgender Kostenverlauf (Abb. 3.3.19.1)

$$K_{C,V} = K_{C,V_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,7} \quad 3.3.19.1$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{C,V_0} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ DM}$$



3.3.1.10 Hilfs- und Nebenanlagen des nuklearen Dampferzeugungssystems

Unter diesem Sammelposten sind die restlichen zum Betrieb des Reaktors erforderlichen, bzw. die infolge seines Betriebes notwendig werdenden Anlageteile zusammengefaßt.

Die AEG unterscheidet dabei zwischen Hilfssystemen und Nebenanlagen. Die Hilfssysteme umfassen die restlichen, zum Betrieb des Reaktors notwendigen Anlagen wie Brennstoffhandhabungseinrichtung, Notkühlungs-, Vergiftungsanlage usw., während die Nebenanlagen alle durch den Betrieb des Reaktors notwendig werdenden Anlagen einschließen wie Druckabbausystem oder Druckhülle, Abgasanlage usw..

Die SSW nehmen diese Differenzierung nicht vor und fassen die restlichen Anlagen unter dem Begriff nukleare Hilfs- und Nebenanlagen zusammen.

Da von den Firmen nur Angaben in dieser Zusammenstellung zu erhalten sind, soll die oben angeführte Einteilung für die einzelnen Reaktortypen beibehalten werden.

3.3.1.10.1 Die Kosten der Hilfssysteme von Siedewasser - Reaktor - Anlagen

Die Kostenangabe umfaßt die Anlagekosten folgender Anlageteile:

Primärreinigung, Leerlaufkühlung, Notkondensatoren, Notkühlung, Vergiftung, Schildkühlung, Komponentenkühlsystem und Brennstoffhandhabung.

Die Kosten der Hilfssysteme belaufen sich nach Angaben der AEG auf ca. 7 % der direkten Anlagekosten einer 600 MW_e-Siedewasser-Reaktor-Anlage. Das sind bei den geschätzten Anlagekosten von 276 · 10⁶ DM für eine 600 MW_e-Anlage:

$$K_H = 0,07 \cdot 276 \cdot 10^6 = 19,32 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Für den Kostenverlauf in der Umgebung von 600 MW_e wird ein Degressions-exponent von

$$m = 0,6$$

angenommen.

Eine lineare Extrapolation im linearen Netz (Abb. 3.3.1.101.1) ergibt die Gleichung

$$\frac{K_H}{[\text{DM}]} = 18,72 \cdot 10^3 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 8,09 \cdot 10^6 \quad 3.3.1.101.1$$

für $N \geq 500 \text{ MW}_e$.

Die Darstellung im doppelt-logarithmischen Netz läßt sich dann durch folgende Gleichungen wiedergeben (Abb. 3.3.1.101.2)

$$K_H = K_{H_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.1.101.2$$

mit

$$m = 0,6$$

$$K_{H_0} = 19,32 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

im Bereich

$$200 \text{ MW}_e \leq N \leq 800 \text{ MW}_e$$

und

$$m = 0,7$$

$$K_{H_0} = 23 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

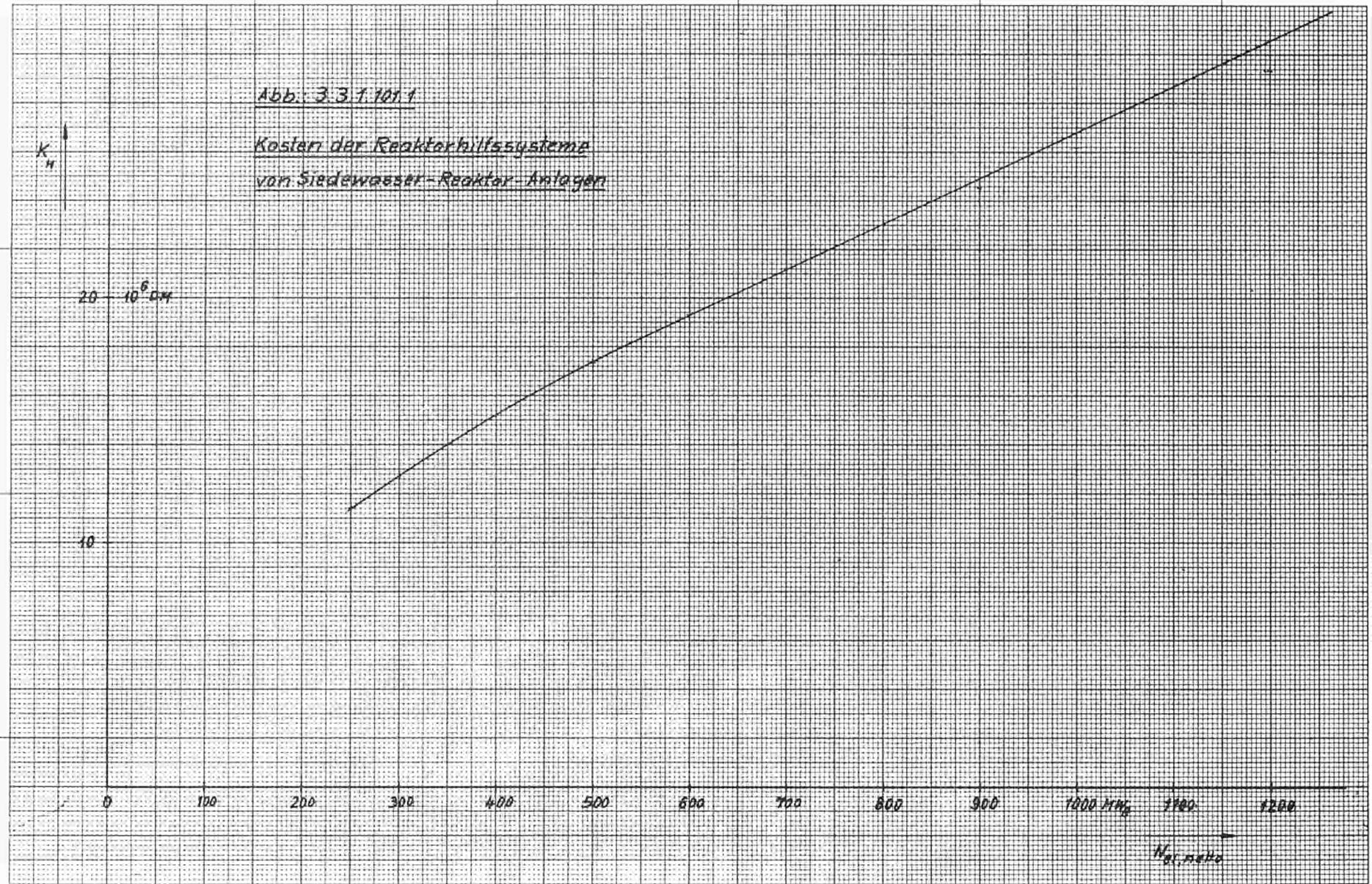
$$N_0 = 800 \text{ MW}_e$$

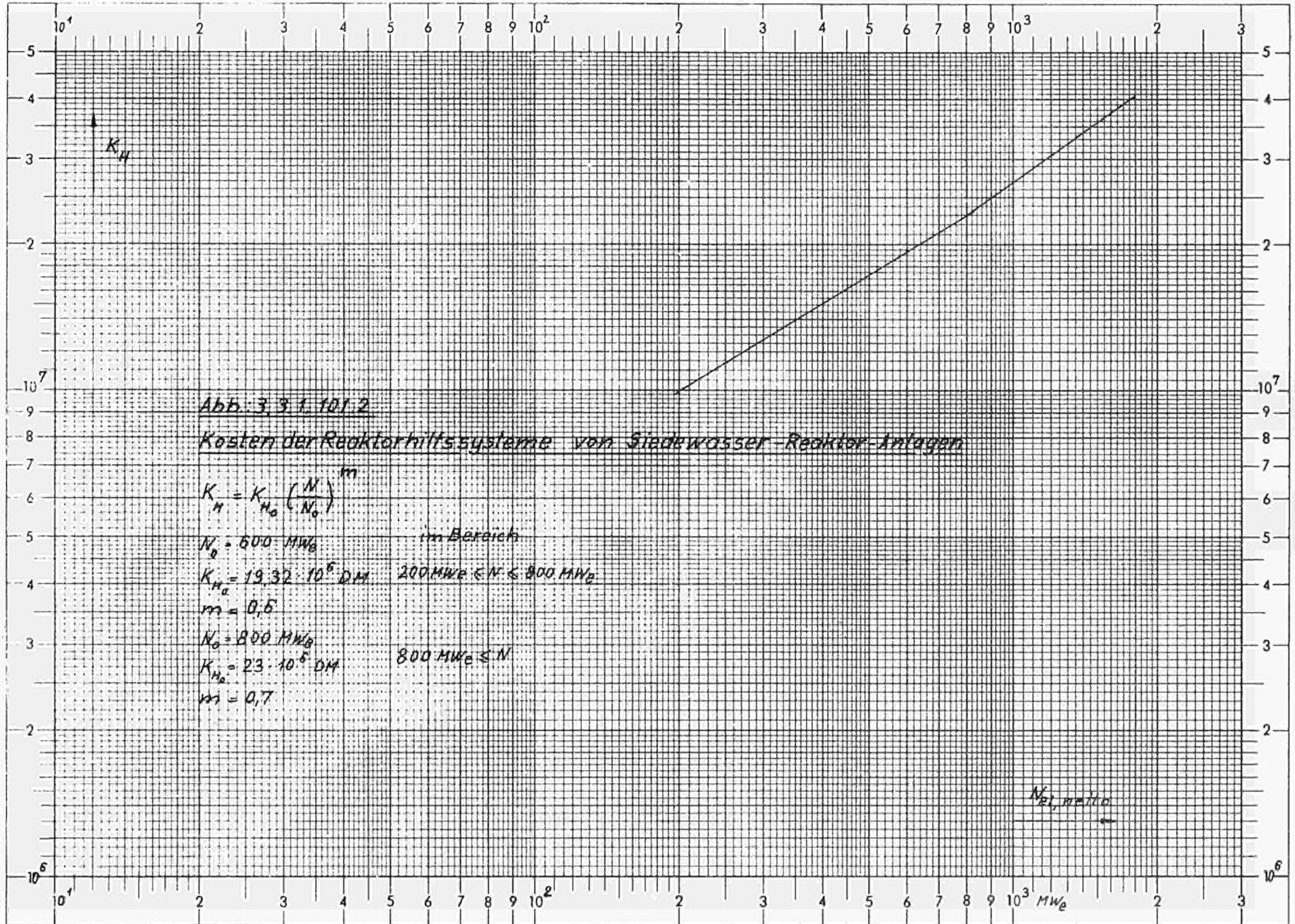
im Bereich

$$800 \text{ MW}_e \leq N$$

Abb. 3.3.1.101.1

Kosten der Reaktorhilfssysteme
von Siedewasser-Reaktor-Anlagen





3.3.1.10.2 Die Kosten der Nebenanlagen von Siedewasser-Reaktor-Anlagen

Zu diesem Kostenkomplex gehören u.a. das Reaktorumschließungsgehäuse, die Wasseraufbereitungsanlage, die Abgasanlage und die Einrichtungen des Feststofflagers. Bei einer 600 MW_e-Siedewasser-Reaktor-Anlage betragen die Kosten dieser Nebenanlagen etwa 4 ... 5 % der gesamten direkten Anlagekosten. Etwa die Hälfte dieser Kosten also 2 ... 2,5 % entfallen auf das Reaktorumschließungsgehäuse.

3.3.1.10.21 Die Kosten des Reaktorumschließungsgehäuses von Siedewasser-Reaktor-Anlagen

Das Reaktorumschließungsgehäuse hat die Aufgabe, die nach einem Unfall eventuell aus dem Reaktordruckgefäß austretenden radioaktiven Stoffe nicht in die Umgebung entweichen zu lassen. Zu diesem Zweck werden hohe Anforderungen an seine Dichtigkeit gestellt.

Die Bauart des Reaktorumschließungsgehäuses und die angewendeten Auslegungsprinzipien richten sich danach, ob der nach einem Unfall austretende Wasserdampf vollkommen kondensiert, teilweise kondensiert oder einfach in das Umschließungsgehäuse eingeleitet wird.

Werden keine Maßnahmen zur Kondensation des Wasserdampfes getroffen, so muß das Reaktorumschließungsgehäuse für den Druck ausgelegt werden, der sich aus der Verdampfung des gesamten Primärkreisinhaltes ergibt. Abb. 3.3.1.1021.1 zeigt die Auslegungsparameter einer solchen "Standard-Druckschale" nach einer Veröffentlichung von W. ULRICH^{*)} Diese Form des Reaktorumschließungsgehäuses wurde bei den bisher gebauten Siedewasser-Reaktor-Anlagen kleinerer Leistung fast ausschließlich verwendet. Wegen der erforderlichen Dichtigkeit und des zu beherrschenden Druckes werden derartige Umschließungsgehäuse als Stahl-druckschalen gebaut.

Mit größer werdender Auslegungsleistung nimmt das erforderliche freie Volumen innerhalb der Druckschale bei gleichem Auslegungsdruck zu. Eine Volumenzunahme kann nur durch eine Erhöhung des Auslegungsdruckes

^{*)} W. ULRICH: Ausführungsformen von Reaktorgebäuden
Atomwirtschaft 8 (1963) Juli/Aug. S. 418/423

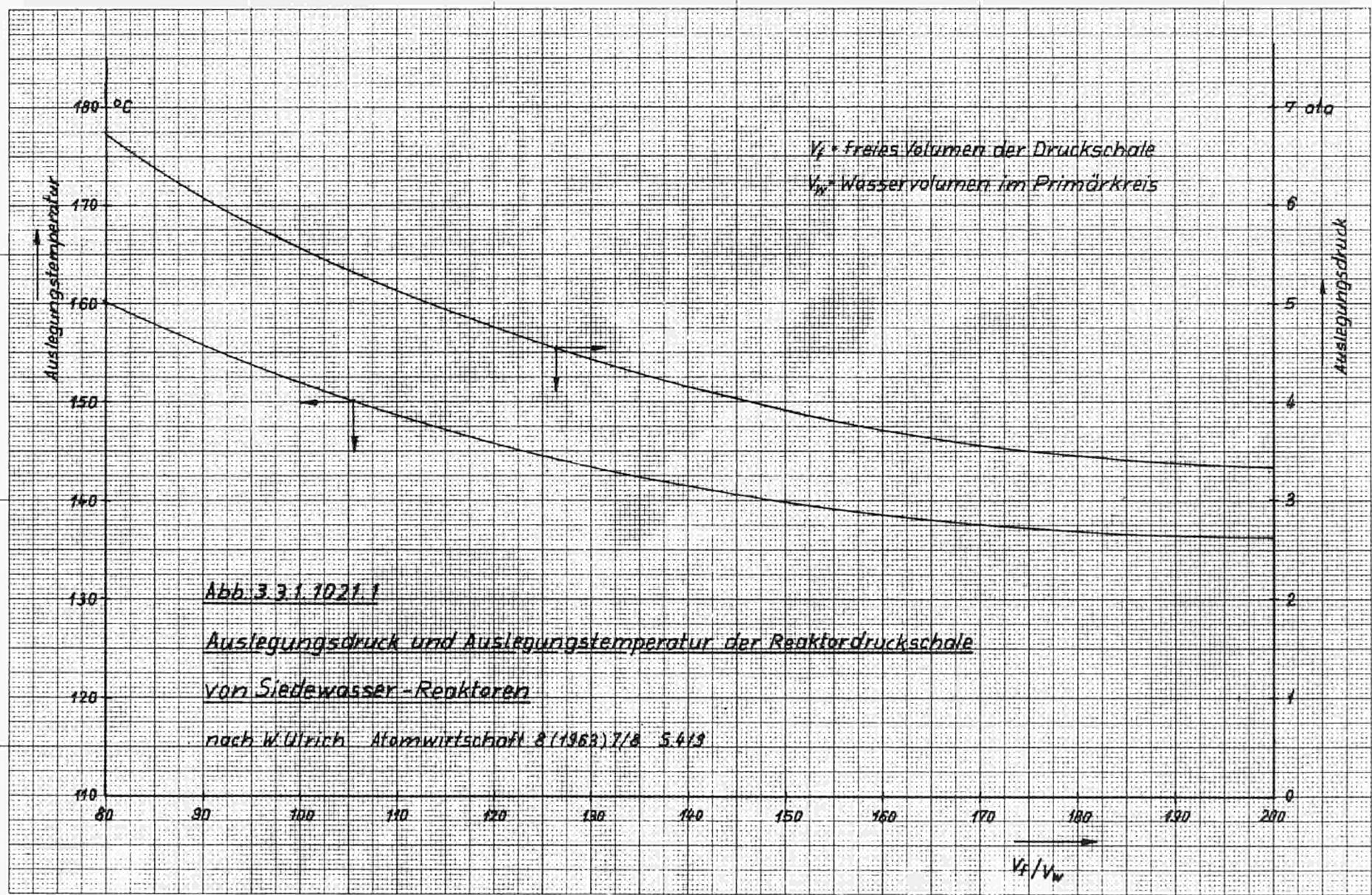


Abb. 3.3.1.7021.1

Auslegungsdruck und Auslegungstemperatur der Reaktor-druckschale

von Siedewasser-Reaktoren

nach W. Ulrich Atomwirtschaft 8 (1963) 7/8 5.419

verringert werden, was wegen des höheren Druckgefälles zu einer Vergrößerung der Leckrate führen würde.

In beiden Fällen ist eine Zunahme der Auslegungsleistung mit einer Zunahme der Wanddicke der Druckschale verbunden. Schweißungen ohne anschließendes Spannungsfrei-Glügen sind jedoch nur bis zu einer Wandstärke von ca. 30 mm zulässig.

Diese Schwierigkeiten führten zur Entwicklung des sogen. Druckabbau-systems (pressure suppression). Bei diesem System wird der nach einem Bruch aus dem Dampferzeugersystem austretende Dampf in mit Wasser gefüllten Kondensationskammern kondensiert. Das Reaktordruckgefäß mit der Abschirmung befindet sich einschließlich der Umwälzkreise in einer druckfesten und gasdichten Stahlbetonkammer, die durch Rohre mit den Kondensationskammern verbunden ist. Die druckfeste Stahlbetonkammer ist für einen Überdruck von 4 ... 5 atü ausgelegt und hat wesentlich kleinere Abmessungen als eine vergleichbare Standard-Druckschale. Außerdem wirken die Betonmassen als zusätzliche Abschirmung.

Wegen dieser Vorteile wird das Druckabbau-system bei vielen neueren Konzeptionen von Reaktoranlagen über 200 MW_e vorgesehen. Ob es jedoch auch die kostenmäßig günstigste Lösung darstellt, bleibt noch zu untersuchen. Denkbar ist z.B. auch eine Lösung, bei der nur ein Teil des Dampfes kondensiert wird, während der Rest in einer entsprechend leicht dimensionierten Stahl- oder Spannbeton-Druckschale einen geringen Überdruck(ca.0,5 ... 2 atü) aufbaut.

Spez. Kosten von Standard-Druckschalen und Druckabbau-systemen sind von W. ULRICH^{*)} und R.A. JOHNSON^{**)} veröffentlicht worden. Die Kostenkurven sind in Abb. 3.3.1.1021.2 und 3 wiedergegeben. Die Ergebnisse von Johnson wurden dem Artikel ULRICHs in der Atomwirtschaft entnommen und zum Kurs von 1\$ = 4 DM umgerechnet.

^{*)} W. ULRICH : Kosten der Reaktorgebäude für Leistungsreaktoren
Atomwirtschaft 10 (1965) 4 S. 169/171

^{**)} R. A. JOHNSON: Containment for Boiling Water Reactors
ASME-Paper 62 - WA - 306 (1962)

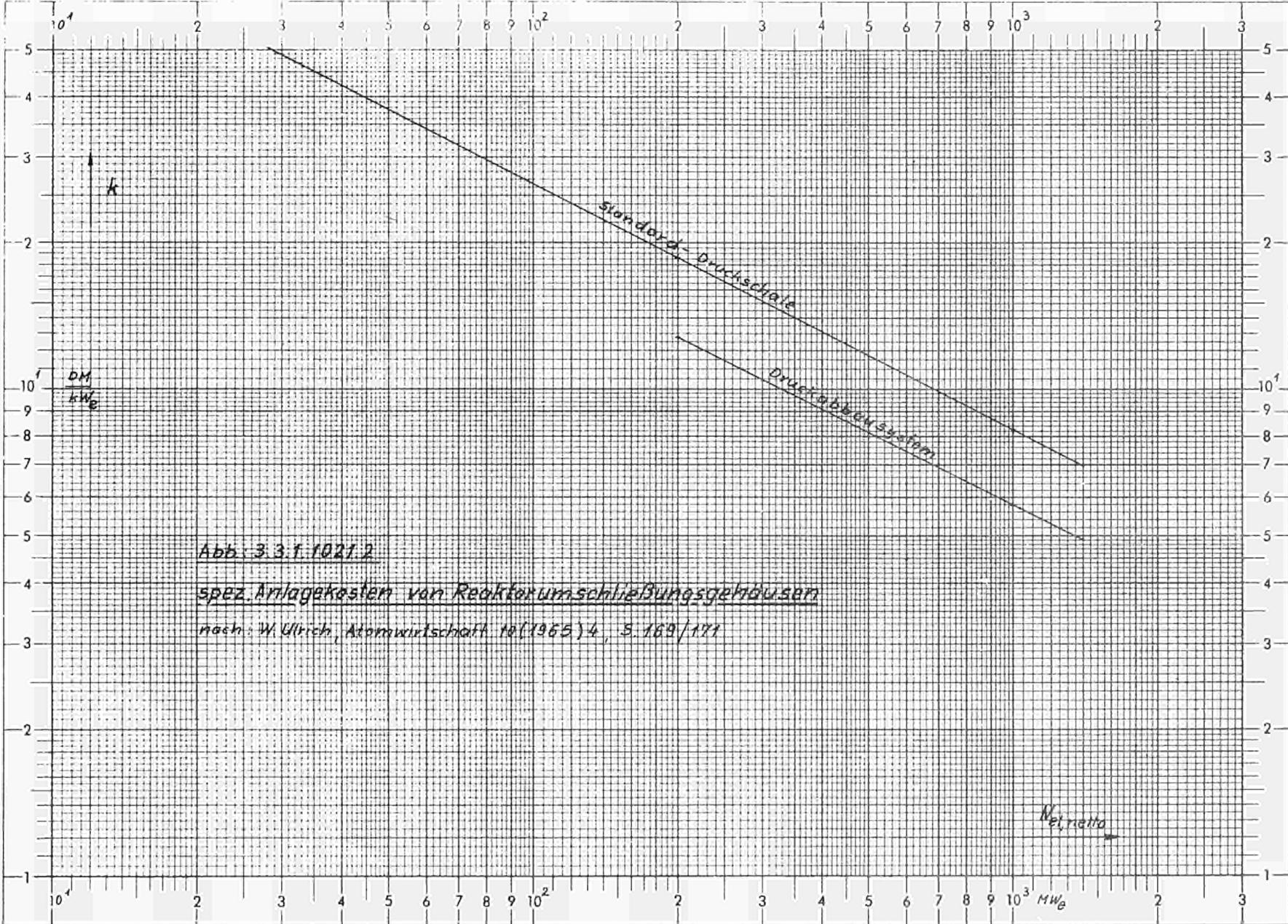
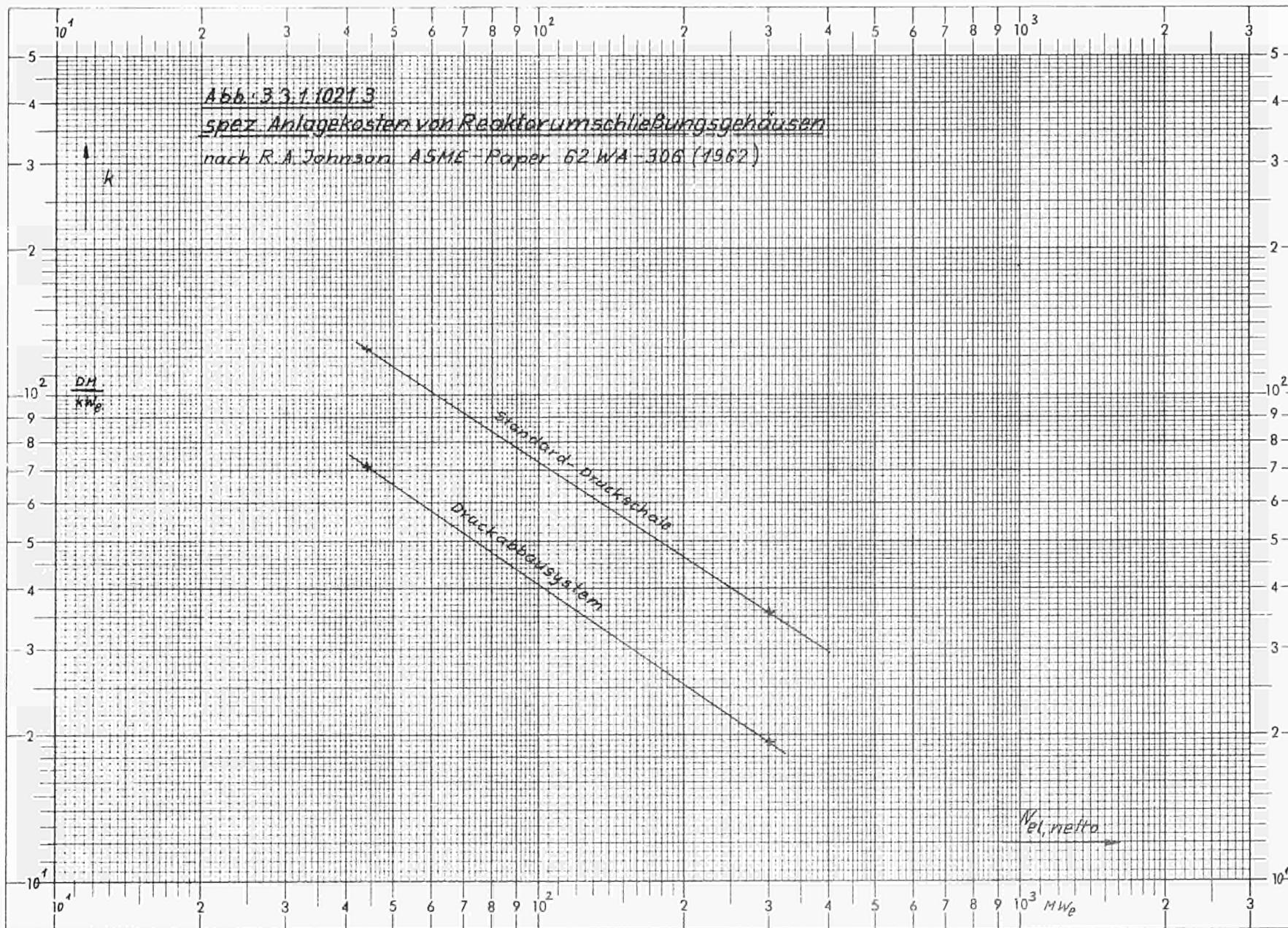


Abb. 3.3.1.1021.2
 spez. Anlagekosten von Reaktorumschließungsgehäusen
 nach: W. Ulrich, Atomwirtschaft 10(1965)4, S. 169/177



Eine Analyse der Kurven ergibt

1) Standard-Druckschale

a) Kosten nach ULRICH

$$k_{St,D} = k_{St,D_0} \left(\frac{N_0}{N}\right)^{0,51} \quad 3.3.1.1021.1$$

$$k_{St,D_0} = 10,8 \text{ DM/kW} \quad \text{im Bereich}$$

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e \quad 10 \text{ MW}_e \leq N \leq 1000 \text{ MW}_e$$

bzw.

$$K_{St,D} = K_{St,D_0} \left(\frac{N_0}{N}\right)^{0,49} \quad 3.3.1.1021.2$$

$$K_{St,D_0} = 6,48 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

b) Kosten nach JOHNSON

$$k_{St,D} = k_{St,D_0} \left(\frac{N_0}{N}\right)^{0,65} \quad 3.3.1.1021.3$$

$$k_{St,D_0} = 35,64 \text{ DM/kW} \quad \text{im Bereich}$$

$$N_0 = 300 \text{ MW}_e \quad 44 \text{ MW}_e \leq N \leq 300 \text{ MW}_e$$

bzw.

$$K_{St,D} = K_{St,D_0} \left(\frac{N_0}{N}\right)^{0,35} \quad 3.3.1.1021.4$$

$$K_{St,D_0} = 10,69 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$N_0 = 300 \text{ MW}_e$$

2) Druckabbausystem

a) Kosten nach ULRICH

$$k_{DA} = k_{DA_0} \left(\frac{N_0}{N}\right)^{0,49} \quad 3.3.1.1021.5$$

$$k_{DA_0} = 7,45 \text{ DM/kW} \quad \text{im Bereich}$$

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e \quad 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1000 \text{ MW}_e$$

bzw.

$$K_{DA} = K_{DA_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{0,51} \quad 3.3.1.1021.6$$
$$K_{DA_0} = 4,47 \cdot 10^6 \text{ DM}$$
$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

b) Kosten nach JOHNSON

$$k_{DA} = k_{DA_0} \left(\frac{N_0}{N}\right)^{0,68} \quad 3.3.1.1021.7$$
$$k_{DA_0} = 19,2 \text{ DM/kW}$$
$$N_0 = 300 \text{ MW}_e$$

im Bereich
 $44 \text{ MW}_e \leq N \leq 300 \text{ MW}_e$

bzw.

$$K_{DA} = K_{DA_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{0,32} \quad 3.3.1.1021.8$$
$$K_{DA_0} = 5,76 \cdot 10^6 \text{ DM}$$
$$N_0 = 300 \text{ MW}_e$$

Für die weiteren Rechnungen soll vorausgesetzt werden, daß alle in dieser Studie betrachteten Siedewasser-Reaktoren mit einem Druckabbausystem ausgerüstet werden.

Extrapoliert man die Kostenangaben von JOHNSON auf eine Leistung von 600 MW_e und vergleicht sie mit den Angaben von ULRICH und denen der AEG, dann erhält man folgendes Ergebnis:

Kosten des Druckabbausystems einer 600 MW_e -Siedewasser-Reaktor-Anlage

a) nach JOHNSON (linear im doppelt-logarithmischen Netz extrapoliert)

$$K_{DA_{600}} = 7,19 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

b) nach ULRICH

$$K_{DA_{600}} = 4,47 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

c) nach Herst.-Angaben (und geschätzten direkten Anlagekosten von $276 \cdot 10^6 \text{ DM}$)

$$\begin{aligned} K_{DA600} &= (0,02 \dots 0,025) 276 \cdot 10^6 \\ &= 5,52 \cdot 10^6 \dots 6,90 \cdot 10^6 \text{ DM} \end{aligned}$$

Man könnte die großen Kostendifferenzen zwischen diesen Angaben vielleicht dadurch erklären, daß die Kosten der Reaktorabschirmung einmal in den Kosten enthalten sind, während sie bei der anderen Angabe fehlen. So rechnet die AEG beispielsweise die Kosten der Reaktorabschirmung zu den Kosten des Reaktorgebäudes.

Nimmt man die Kosten des Druckabbausystems einer 600 MW_e - Siedewasser-Reaktor - Anlage zu

$$K_{DA600} = 6,5 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad 3.3.1.1021.2$$

an, dann liegt die Kostenangabe von JOHNSON diesem Wert am nächsten. Da jedoch auch im Kostenverlauf erhebliche Unterschiede bestehen (in 0,01...0,51), soll der Kostenverlauf anhand des erforderlichen Bauvolumens abgeschätzt werden.

3.3.1.10.22 Die Abmessungen, die optimale Dichte und die Kosten der Reaktorabschirmung

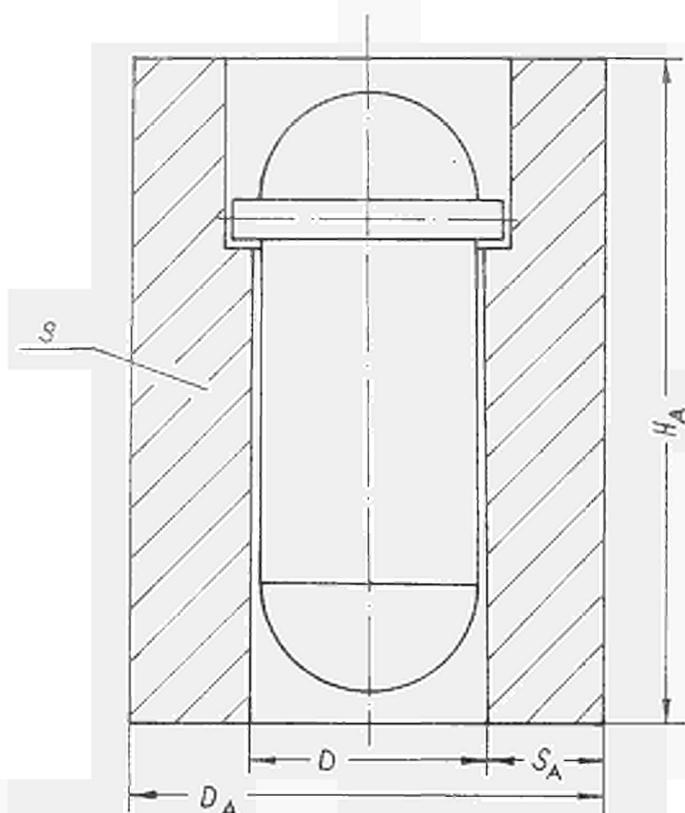


Abb. 3.3.1.10.22.1

Zur Abschätzung des Bauvolumens eines Druckabbausystems muß zunächst einmal eine Aussage über den Raumbedarf des Reaktorreaktorbehälters einschließlich der Abschirmung gemacht werden.

Nach H. WEBER^{*)} ist die optimale Dichte g der Reaktorabschirmung eine Funktion des Reaktoraußendurchmessers. Eine Analyse der dort angegebenen Funktionskurve ergibt:

$$g = g_0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{-0,65} \quad 3.3.1.10.22.2$$

mit

$$g_0 = 2,9 \text{ g/cm}^3$$

$$D_0 = 5 \text{ m}$$

*) H. WEBER: "Zur Abschirmung von Leistungsreaktoren"
Atomwirtschaft 6 (1963) Juli/Aug. S. 409/410

Als Reaktoraußendurchmesser soll hier der aus Gleichung 3.3.111.12 berechnete Reaktordurckgefäß-Innendurchmesser mit einem Zuschlag für Wandstärke und Einbauspiel betrachtet werden.

$$\frac{D}{[m]} \approx \frac{D_i}{[m]} + 0,6 \quad 3.3.1.1022.2$$

mit einer notwendigen Massenbelegung von $m = 6,7 \text{ t/m}^2$ ergibt sich die Dicke S_A der Abschirmung zu

$$\frac{S_A}{[m]} = \frac{m}{\rho} \frac{[t/m^3]}{[t/m^2]} = \frac{6,7}{\rho [t/m^2]} \quad 3.3.1.1022.3$$

Als Außendurchmesser der Rekaotrabschirmung erhält man damit

$$D_A = D + 2 S_a$$

$$D_A = D + 2 \frac{m}{\rho_o} \left(\frac{D}{D_o}\right)^{0,65} \quad 3.3.1.1022.4$$

mit

$$m = 6,7 \text{ t/m}^2 = \text{Massenbelegung}$$

$$\rho_o = 2,9 \text{ t/m}^3 = \text{Bezugsdichte}$$

$$D_o = 5 \text{ m} = \text{Bezugsdurchmesser}$$

$$D \approx D_i + 0,6 = \text{Reaktoraußendurchmesser [m]}$$

Die Höhe der Abschirmung H_A kann im Rahmen dieser Betrachtung ungefähr der Reaktordurckgefäßhöhe H gleichgesetzt werden.

$$H_A \approx H$$

In dem gleichen Artikel (siehe Fußnote *) Seite 223) werden auch spez. Betonpreise (DM/m^3) in Abhängigkeit von der Dichte ρ nach deutschen Angeboten angegeben.

$$k_{B,A} = k_{B,A_o} \left(\frac{\rho}{\rho_o}\right)^{2,7} \quad 3.3.1.1022.5$$

mit

$$k_{B,A_o} = 60? \text{ DM/m}^3$$

$$\rho_o = 2,9 \text{ t/m}^3$$

Obwohl an dieser Stelle die Kosten der Abschirmung nicht zur Debatte stehen, soll eine Schätzformel angegeben werden, nach der die Kosten ungefähr ermittelt werden können.

$$K_{B,A} = k_{B,A} \cdot V_{B,A} \quad 3.3.1.1022.6$$

mit

$$V_{B,A} = (D + S_A) \pi \cdot S_A \cdot H_A \quad 3.3.1.1022.7$$

Für die Kosten pro Längeneinheit der Abschirmung ergibt sich unter Benutzung der Gleichungen 3.3.1.1022.1 bis 7

$$\frac{K_{B,A}}{H_A} = \pi \cdot m \frac{k_{B,A_0}}{s_0} \left[D \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1,11} + \frac{m}{s_0} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{0,46} \right] \quad 3.3.1.1022.8$$

mit

$$m = 6,7 \text{ t/m}^2 = \text{Massenbelegung}$$

$$k_{B,A_0} = 602 \text{ DM/m}^3 = \text{Betonbezugspreis}$$

$$s_0 = 2,9 \text{ t/m}^3 = \text{Bezugsdichte}$$

$$D_0 = 5 \text{ m} = \text{Bezugsdurchmesser}$$

$$D \approx D_i + 0,6 = \text{Reaktoraußendurchmesser} \quad [\text{m}]$$

$$\frac{K_{B,A}}{H_A} = \text{Kosten der Abschirmung je Meter Länge} \quad \left[\frac{\text{DM}}{\text{m}} \right]$$

3.3.1.10.23 Abmessungen und Anlagekosten des Druckabbausystems

Maßgebend für die Abmessungen des Druckabbausystems sind der Raumbedarf der zu umschließenden Anlagenteile, der benötigte Kondensationsraum und die Art der Anordnung dieser Räume.

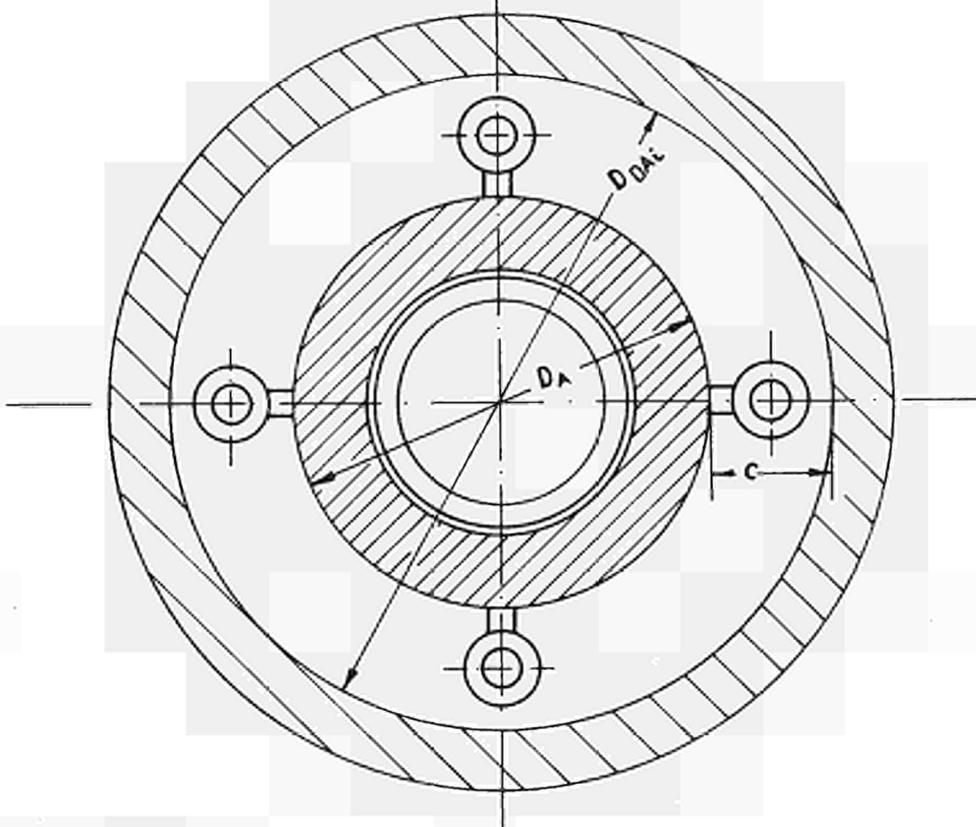


Abb. 3.3.1.10.23.1

Im Abschnitt 3.3.1.10.23 ist der für das Reaktordruckgefäß einschließ-
lich der Abschirmung benötigte Raum ermittelt worden.

Die Aggregate der Umwälzkreise werden am zweckmäßigsten entsprechend
der Abbildung 3.3.1.10.23.1 rings um die Abschirmung herum angeordnet,
und das Ganze mit einer druckfesten Stahlbetonschale umgeben. In den
Ringraum zwischen Abschirmung und Druckschale tritt bei einem Unfall
der Dampf ein und wird dort durch Rohre in die Kondensationskammern
abgeleitet. Als größter anzunehmender Unfall wird der Bruch einer
Hauptrohrleitung, d. h. einer Leitung des Umwälzkreises, ange-

sehen. Aus Festigkeitsgründen wird man versuchen, den Durchmesser der Druckschale D_{DAi} möglichst klein zu gestalten. Der kleinstmögliche Durchmesser bei der Anordnung nach Abb. 3.3.1.1023.1 ist durch den Außendurchmesser D_A der Reaktorabschirmung plus einem Abstand C für die Unterbringung der Aggregate des Umwälzkreises gegeben. Da bei allen Dampferzeugergrößen Einheitsumwälzkreisläufe verwendet werden sollen, bleibt der radiale Platzbedarf C für alle Kraftwerksnennleistungen der gleiche.

$$\begin{aligned} D_{D,A} &= D_A + 2C \\ D_{D,A} &= D + 2 \left[\frac{m}{s_o} \left(\frac{D}{D_o} \right)^{0,65} + C \right] && 3.3.1.1023.1 \\ m &= 6,7 \text{ t/m}^2 = \text{Massenbelegung} \\ s_o &= 2,9 \text{ t/m}^3 = \text{Bezugsdichte} \\ D_o &= 5 \text{ m} = \text{Bezugsdurchmesser} \\ D &= \text{Reaktordruckgefäß-Außendurchmesser} \\ C &= 5 \dots 6 \text{ m} \\ D_{D,A} &= \text{Durchmesser des Reaktorumschließungsgehäuses} \end{aligned}$$

Es bleibt nun noch zu diskutieren, ob dieser kleinstmögliche Durchmesser auch tatsächlich eine sinnvolle Lösung darstellt.

Bei einer Standard- oder Voll-druckschale ist das Verhältnis freier Raum zu Wasservolumen ausschlaggebend für den sich innerhalb der Druckschale aufbauenden Enddruck. Beim Druckabbausystem liegen die Verhältnisse etwas anders. Hier erreicht der Druck seinen Maximalwert kurze Zeit nach dem Eintreten des Rohrleitungstruches und fällt dann sehr schnell auf einen nahezu konstanten geringen Überdruck von 2 ... 3 at ab.

Der Maximalwert, für den die Druckschale ausgelegt werden muß, ist von dem freien Raum innerhalb des Ringraumes zwischen Reaktorabschirmung und Druckschale, den Öffnungsverhältnissen von Zu- und Abströmöffnungen, sowie der Eintauchtiefe der Abströmröhre in das Kondensationsbecken abhängig. Werden Einheitskreisläufe verwendet, so ist die bei einem größten anzunehmenden Unfall entstehende Zuströmöffnung, wegen der bei allen Kreisläufen gleichen Rohrnennweite, von der Leistung

unabhängig. Damit wird auch der Auslegungsdruck bzw. der notwendige freie Raum bei sonst gleichen Verhältnissen von der Leistung unabhängig. Die Reaktorleistung beeinflusst nur die Menge des zur Kondensation erforderlichen Wassers und damit die Größe der Kondensationsbecken.

Eine für alle Leistungen konstante Ringraumbreite läßt sich also auch von diesem Standpunkt aus durchaus vertreten, wenn sie nur so bemessen ist, daß im ungünstigsten Fall der Maximaldruck nicht zu groß wird.

Die minimale Höhe des Reaktorumschließungsgehäuses wird durch die "Höhe über alles" des Reaktordruckgefäßes einschließlich der Steuerstabantriebsorgane bestimmt. Die Abmessungen des gesamten Druckabbausystems, d.h. Reaktorumschließungsgehäuse plus Kondensationskammern, hängt von Anordnung und Ausführung der Kondensationskammern ab.

Die Kondensationskammern können als Betonkammern oder aber auch als Stahlbehälter ausgeführt werden. Die Möglichkeiten der Anordnung werden durch die Forderung nach möglichst kurzen Zuleitungen, durch die Ausführung der Ausführungart - Betonkammer oder Stahlbehälter - und nicht zuletzt durch die Bedingung der Wirtschaftlichkeit erheblich eingeschränkt.

Die GE verwendet in ihren Studien ¹⁾ einen Stahlbehälter, der das Reaktorumschließungsgehäuse in Form eines Torus umgibt und durch Rohrleitungen mit ihm verbunden ist.

Das Druckabbausystem, das die AEG in ihrer 600 MW_e - Studie vorsieht, besteht aus Betonkammern, die mit dem Reaktorumschließungsgehäuse eine bauliche Einheit bilden.

Von folgenden Betrachtungen soll diese recht kompakte Anordnung zugrunde gelegt werden.

Der Außendurchmesser der Anlage ist durch den Außendurchmesser $D_{D,A}$ des Reaktorumschließungsgehäuses bestimmt, die Kondensationskammern werden unterhalb des Reaktordruckgefäßes angeordnet und beeinflussen nur die Höhe des Bauwerkes. Das notwendige Volumen der Kondensationskammern ist von der Wassermenge im nuklearen Dampferzeugungssystem und der in ihr aufgespeicherten Energie abhängig. Ist das Verhältnis Volumen der Kondensationskammern

¹⁾ 1000 MW Boiling Water Reactor Plant Feasibility Study
GEAP - 4476 Februar 14, 1964
J. E. Kjemtrup The Dual Suppression System for BWR Containment
August 23, 1963

zu Wasservolumen des Dampferzeugungssystems und die Grundfläche der Kondensationskammern bekannt, dann ergibt sich die Gesamthöhe der Kondensationskammern zu

$$H_K = V \frac{V_W}{F_K} \quad 3.3.1.1023.2$$

mit

$$H_K = \text{Gesamthöhe der Kondensationskammern}$$
$$V = \frac{V_K}{V_W} = \frac{\text{Gesamtvolumen der Kondensationskammern}}{\text{Wasservolumen des Dampferzeugungssystems}}$$

$$F_K = \text{gesamte Grundfläche der Kondensationskammern}$$

Zur Abschätzung der erforderlichen Höhe wird näherungsweise

$$V_W \approx \pi/4 D^2 \cdot H \quad 3.3.1.1023.3$$

mit

$$D = \text{Reaktordruckgefäß - Außendurchmesser (Gl. 3.3.1.1023.3)}$$

$$H = \text{Reaktordruckgefäß - Höhe (Gl. 3.3.112.8)}$$

und

$$F_K \approx \pi/4 D_{D,A}^2 \quad 3.3.1.1023.4$$

mit

$$D_{D,A} = \text{Durchmesser des Reaktorumschließungsgehäuses (siehe Gl. 3.3.1.1023.1)}$$

gesetzt, d. h. als Wasservolumen des Dampferzeugungssystems wird das Volumen des Druckgefäßes und als Grundfläche die Querschnittsfläche des Reaktorumschließungsgehäuses eingesetzt.

Die Höhe des Bauwerkes für das gesamte Druckabbausystem, d. h. Reaktorumschließungsgehäuse plus Kondensationskammern, ergibt sich bei dieser Anordnung zu

$$H_{D,A} \approx H + H_K + C \quad 3.3.1.1023.5$$

mit

$$H = \text{Höhe des Reaktordruckgefäßes (Gl. 3.3.112.8)}$$

$$H_K = \text{Gesamthöhe der Kondensationskammern (Gl. 3.3.1.1023.2)}$$

$$C = \text{Konstante}$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen 3.3.1.1023.2 bis 4 ergibt sich

$$H_{D,A} \approx H \left(1 + V \frac{D^2}{D_{D,A}^2} \right) + C \quad 3.3.1.1023.6$$

mit

$$V = 13$$

$$C = 4 \text{ m}$$

$$H = \text{Höhe des Reaktordruckgefäßes} \quad (\text{Gl. 3.3.112.5})$$

$$D = \text{Außendurchmesser des Reaktordruckgefäßes} \quad (\text{Gl. 3.3.1.1022.3})$$

$$D_{D,A} = \text{Durchmesser des Reaktorumschließungsgehäuses} \quad (\text{Gl. 3.3.1.1023.1})$$

Die Werte für $V=12,5 \dots 13$ und $C=4 \dots 5$ m wurden aus Angaben in der AEG - 600 MW_e - Studie ermittelt.

Aus den Gleichungen 3.3.1.1023.1 und 6 erhält man für den Umbauteninhalt des Druckabbausystems

$$V_{D,A} = \pi/4 \cdot D_{D,A}^2 \cdot H_{D,A} \quad 3.3.1.1023.7$$

Die Kosten des Druckabbausystems einer 600 MW_e - Anlage betragen nach Herst.- Angaben etwa 2,3...2,4% der gesamten direkten Anlagekosten, was sich bei $276 \cdot 10^6$ DM

$$K_{D,A}^{600} = (0,023 \dots 0,024) \cdot 276 \cdot 10^6 = (6,3 \dots 6,6) \cdot 10^6 \text{ DM}$$

im Mittel kann also mit

$$K_{D,A}^{600} \approx 6,5 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

gerechnet werden.

Das Bauvolumen des Druckabbausystems einer 600 MW_e - Siedewasserreaktor - Anlage ergibt sich mit $D \approx 6$ m und $H \approx 13$ m nach Gl. 3.3.1.1023.7 als

$$V_{D,A}^{600} \approx 1,67 \cdot 10^4 \text{ m}^3$$

Dem entspricht ein Kubikmeterpreis von

$$k_{D,A}^{600} = \frac{K_{D,A}^{600}}{V_{D,A}^{600}} \approx 390 \text{ DM/m}^3$$

Nimmt man an, daß der Kubikmeterpreis in dem betrachteten Bereich zwischen 300 MW_e und 1200 MW_e konstant ist, dann ergeben sich die Kosten des

Druckabbausystems zu

$$\frac{K_{D,A}}{[DM]} = \frac{k_{D,A}}{[DM/m^3]} \frac{V_{D,A}}{[m^3]} = 390 \frac{V_{D,A}}{[m^3]} \quad 3.3.1.1023.8$$

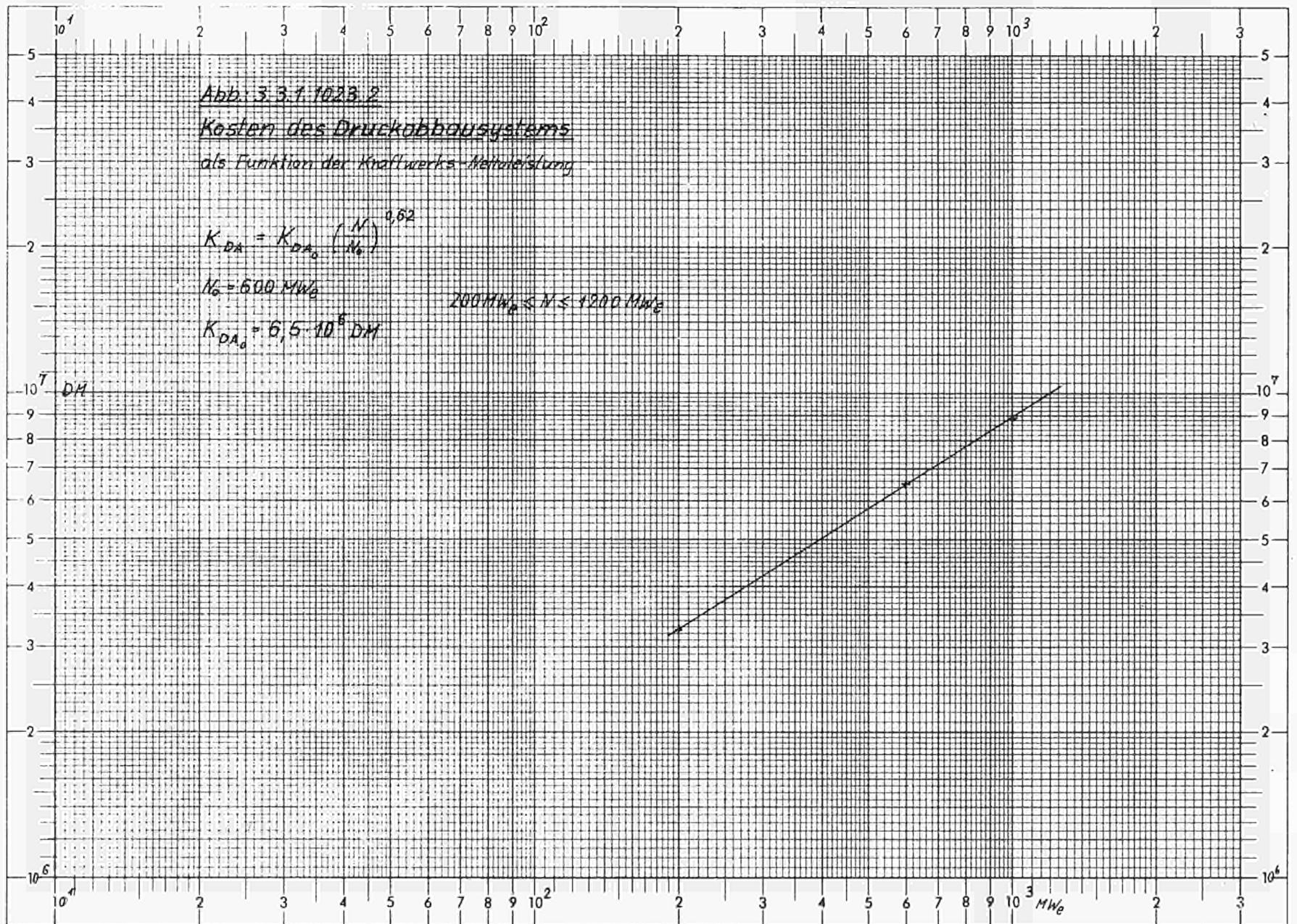
Zur einfacheren Berechnung der Kosten sind unter diesen Voraussetzungen die Kosten für drei Anlagen verschiedener Leistung berechnet und zur Ermittlung der folgenden Potenzformel verwendet worden (siehe Abbildung 3.3.1.1023.2)

$$K_{D,A} = K_{D,A_c} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,62} \quad 3.3.1.1023.9$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{D,A_0} = 6,5 \cdot 10^6 \text{ DM}$$



3.3.1.10.24 Die Kosten der restlichen Nebenanlagen des nuklearen Dampferzeugungssystems von Siedewasser-Reaktor-Anlagen

Diese Kosten enthalten die Anlagekosten der Abgasanlage, der Wasseraufbereitungsanlage und die Kosten der Ausrüstung des Feststofflagers.

Nach Firmenangaben belaufen sich diese Kosten für eine 600 MW_e - Siedewasser-Reaktor-Anlage auf ca. 2 % der gesamten direkten Anlagekosten. Legt man den Schätzwert von 276 · 10⁶ DM zugrunde, dann ergibt sich:

$$K_{N,N_{600}} = 0,02 \cdot 276 \cdot 10^6 = 5,52 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Der Degressionsexponent wird auf

$$m = 0,6$$

geschätzt.

Damit ergibt sich als Kostenverlauf bei linearer Extrapolation im linearen Netz (s. Abb. 3.3.1.1024.1)

$$\frac{K_{N,N}}{[\text{DM}]} = 4,98 \cdot 10^3 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 2,53 \cdot 10^6 \quad 3.3.1.1024.1$$

für $N \geq 600 \text{ MW}_e$

Die doppelt-logarithmische Darstellung (Abb. 3.3.1.1024.2) läßt sich durch die Gleichungen

$$K_{N,N} = K_{N,N_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.1.1024.2$$

mit

$$\begin{aligned} m &= 0,6 && \text{im Bereich} \\ N_0 &= 600 \text{ MW}_e && 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1000 \text{ MW}_e \\ K_{N,N_0} &= 5,52 \cdot 10^6 \text{ DM} \end{aligned}$$

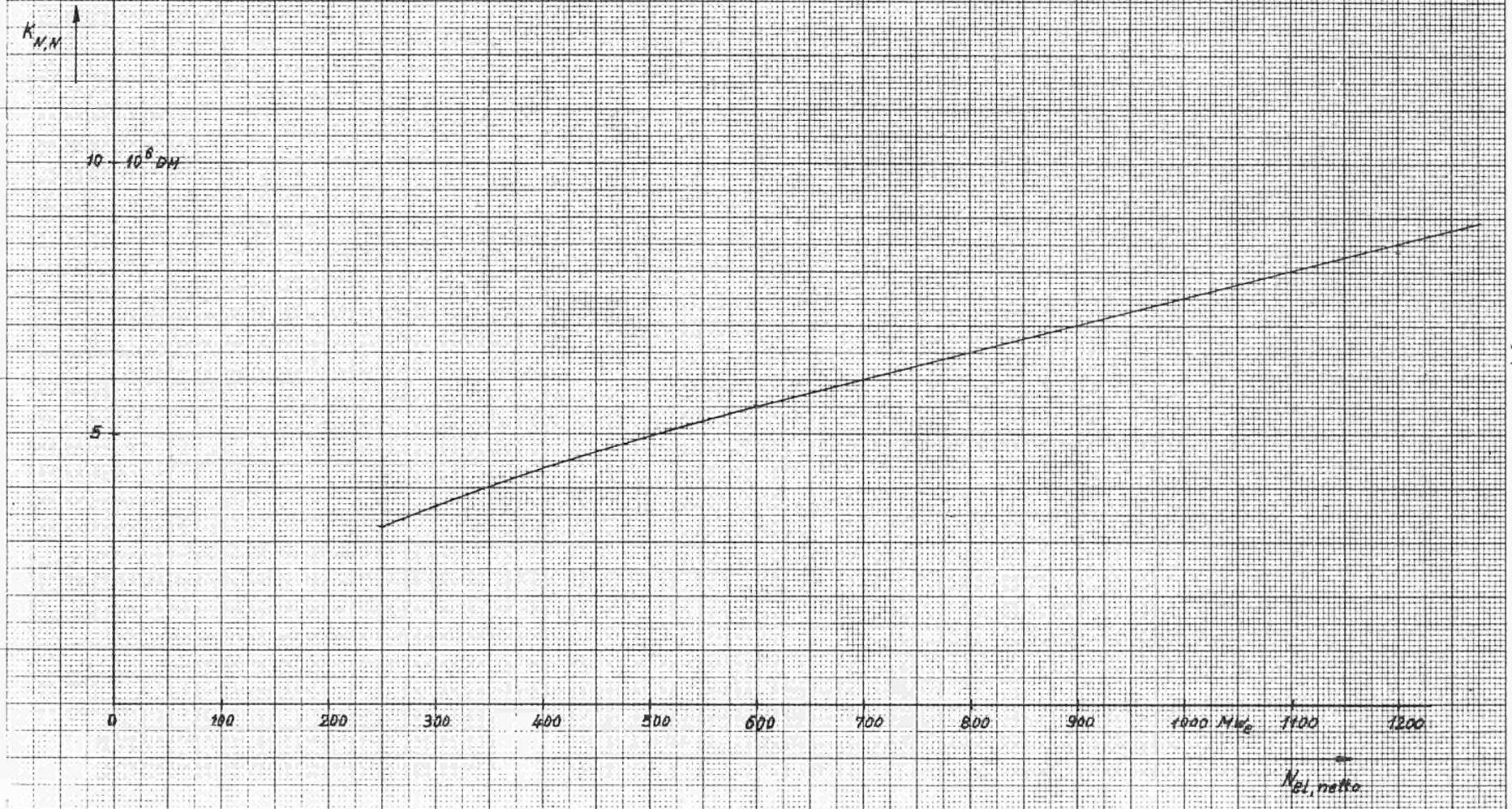
und

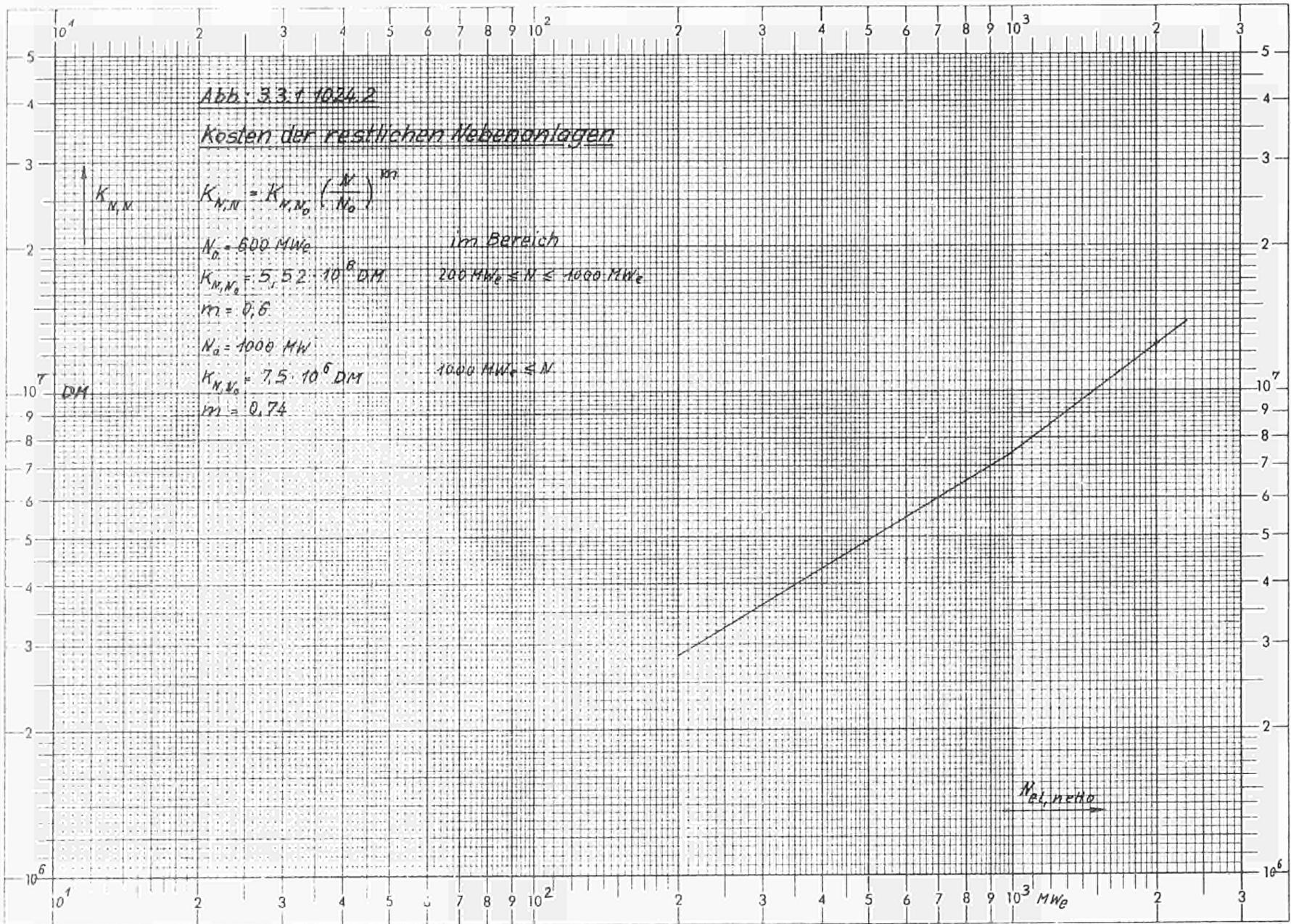
$$\begin{aligned} m &= 0,74 && \text{im Bereich} \\ N_0 &= 1000 \text{ MW}_e && 1000 \text{ MW}_e \leq N \leq 2000 \text{ MW}_e \\ K_{N,N_0} &= 7,5 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

wiedergeben.

Abb. 3.3.1. 1024 1

Kosten der restlichen Nebenanlagen





3.3.1.10.3 Die Kosten der Hilfs- und Nebenanlagen des nuklearen Dampferzeugungssystems von Druckwasser-Reaktor-Anlagen

Unter diesem Begriff sollen die Anlagekosten des Komponentenkühl-systems, des Brennelementtransportsystems, der Noteinspeisungs- und Speichersysteme, der Probenentnahmeeinrichtung, der Wasseraufbereitungsanlage, der Ausrüstung des Reaktorgebäudes und der Lagereinrichtung, sowie die Kosten der Stahldruckschale zusammengefaßt werden.

Nach Herst.- Angaben betragen die Kosten der Hilfs- und Nebenanlagen einer 600 MW_e-Druckwasser-Reaktor-Anlage einschließlich der Kosten für die Stahldruckschale ca. 5 % der gesamten direkten Anlagekosten. Unter Verwendung der geschätzten Kosten von 276 · 10⁶ DM ergibt das

$$K_{N,N} = 0,05 \cdot 276 \cdot 10^6 \text{ DM} = 13,8 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Mit einem geschätzten Degressionsexponenten von

$$m = 0,6$$

in der Umgebung von N = 600 MW_e ergibt eine Extrapolation im linearen Netz (Abb. 3.3.1.103.1) für

$$N \geq 600 \text{ MW}_e$$

$$\frac{K_{N,N}}{[\text{DM}]} = 13 \cdot 10^3 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 6 \cdot 10^6 \quad 3.3.1.103.1$$

Der Kostenverlauf im doppelt-logarithmischen Netz (Abb. 3.3.1.103.2) kann durch folgende Gleichungen approximiert werden:

$$K_{N,N} = K_{N,N_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.1.103.2$$

$$m = 0,6$$

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{N,N_0} = 13,8 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

im Bereich

$$200 \text{ MW}_e \leq N \leq 900 \text{ MW}_e$$

und

$$m = 0,71$$

$$N_0 = 900 \text{ MW}_e$$

$$K_{N,N_0} = 17,7 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

im Bereich

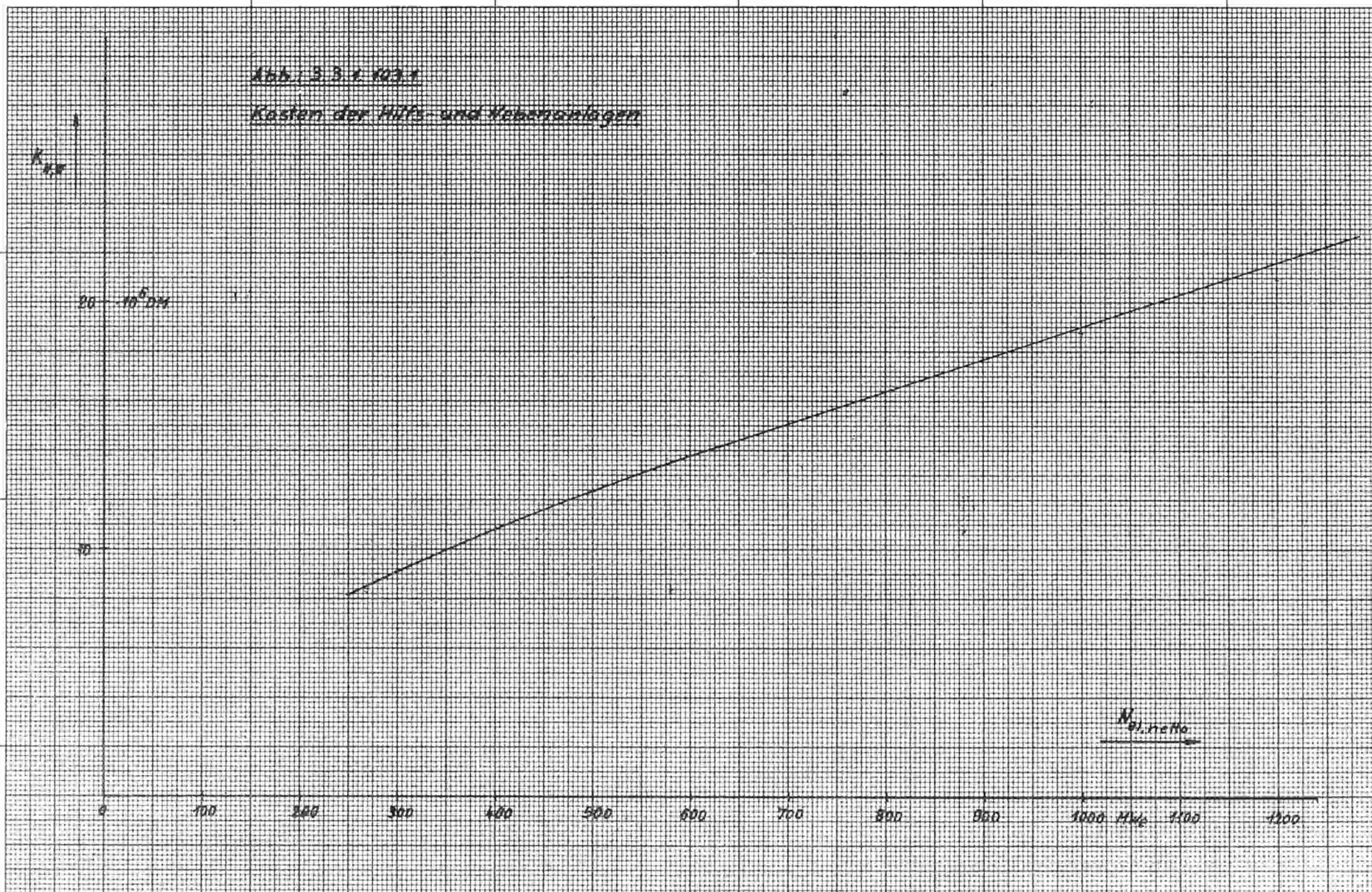
$$900 \text{ MW}_e \leq N \leq 1500 \text{ MW}_e$$

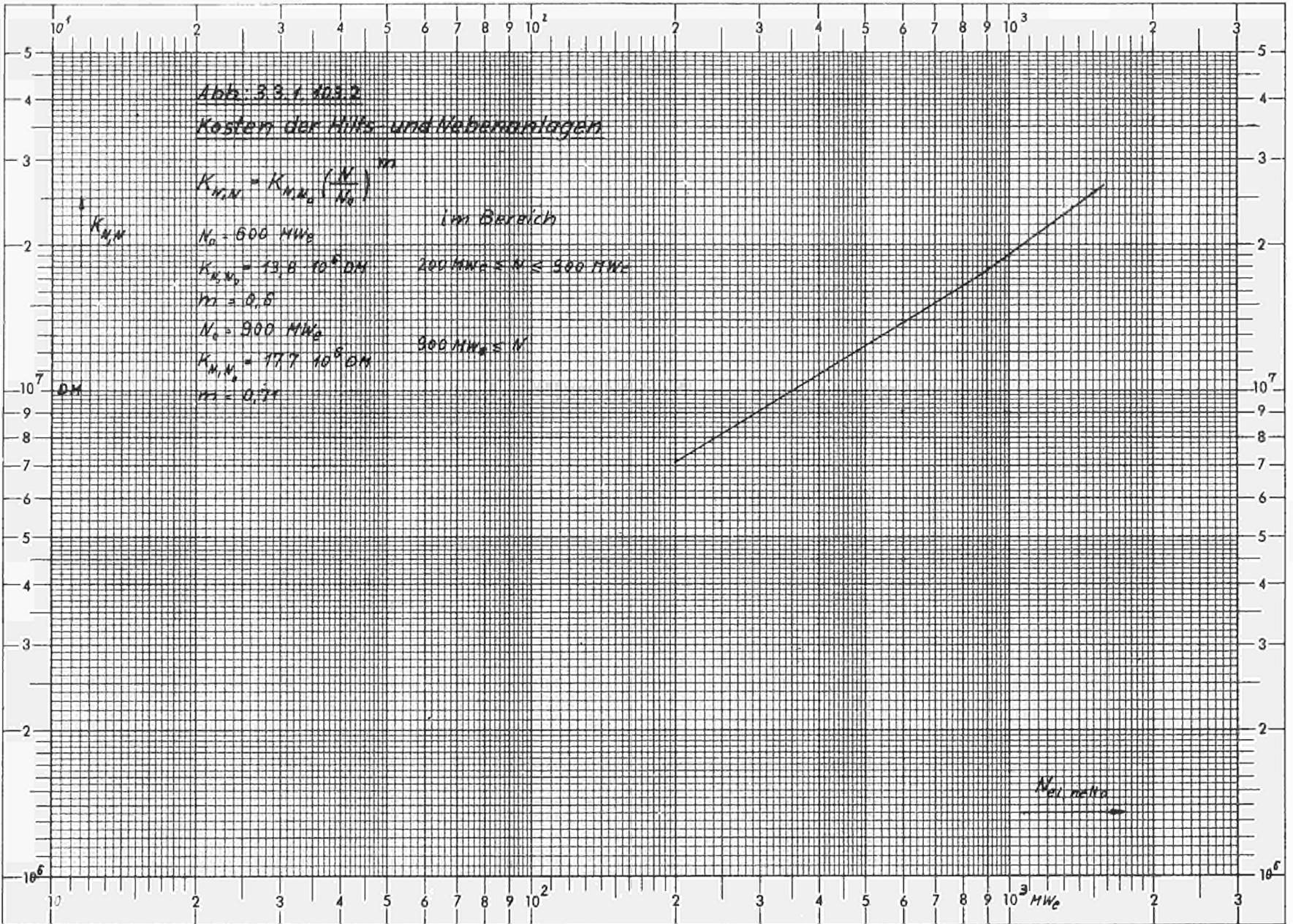
Es wäre interessant, einen Kostenvergleich zwischen der hier verwendeten Kombination zwischen Druckabbausystem mit Stahlumschließungsgehäuse und dem beim Siedewasser verwendeten System anzustellen. Im Prinzip wäre dies mit Hilfe der in Abschnitt 3.3.1.10.23 angewendeten Abschätzmethode möglich.

Im vorliegenden Fall ist ein Kostenvergleich jedoch nur schlecht möglich, da die Kosten dieses Anlageteils bei den uns vorliegenden Angaben auf mehrere Kostenkomplexe verteilt sind, aus denen sie mit den uns zur Verfügung stehenden Informationen nur schlecht herauszulösen sind.

Abb. 3.5.1 103.1

Kosten der Hilfs- und Nebeneinlagen





3.3.1.11 Die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen des nuklearen Dampferzeugungssystems; Transport- und Montagekosten

Die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen sind im Rahmen einer allgemeinen Betrachtung nur summarisch zu erfassen. Im Kraftwerksbau rechnet man für die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen etwa 5...7% der Anlagekosten.

Im folgenden wird angenommen, daß die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen des nuklearen Dampferzeugungssystems im wesentlichen durch die Kosten der Rohrleitungen der Umwälzkreise bestimmt werden, sich also proportional zur Zahl der Kreisläufe ändern. Die Abschätzung dieser Kosten erfolgt daher am zweckmäßigsten durch einen Zuschlag zu den Kosten der Umwälzkreise. Um sowohl für den Siede - als auch für den Druckwasser - Reaktor eine einigermaßen objektive Schätzung zu gewährleisten, werden die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen des nuklearen Dampferzeugungssystems durch einen Zuschlag zu den Kosten der Pumpen der Umwälzkreise berücksichtigt.

Schätzt man die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen des nuklearen Dampferzeugungssystems auf 4...6% und die Kosten der Umwälzpumpen auf 7...10% der Kosten dieses Systems, dann betragen die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen ca. 60% der Kosten der Umwälzpumpen.

Die Berücksichtigung der Kosten der Rohrleitungen und Armaturen (siehe Tabelle 3.41.5) erfolgt dementsprechend einheitlich für Druck - und Siedewasser - Reaktoren durch einen Zuschlag von 60% zu den Kosten der Umwälzpumpen.

Für die Transport- und Montagekosten gilt sinngemäß das in Abschnitt 3.3.1.1.7 Gesagte.

Sie werden beim Umwälzkreis von Siedewasser - Reaktoren durch einen Zuschlag von 20% (siehe Tabelle 3.41.5) und bei der elektrotechnischen Ausrüstung durch einen Zuschlag von 15% (siehe Tabelle 3.41.7) berücksichtigt.

Bei Druckwasser - Reaktoren betragen die Zuschläge beim Umwälzkreis und bei der elektrotechnischen Ausrüstung je 10% (siehe Tabelle 3.41.6 und Tabelle 3.41.8).

3.3.2 Kostenanalyse ausgewählter Komponenten des konventionellen Kraftwerksteiles

Die Kosten des konventionellen Kraftwerksteiles stellen bei Leistungen über 500 MW_e den größten Anteil der gesamten direkten Anlagekosten.

Die Bezeichnung konventionell ist in diesem Zusammenhang etwas irreführend; denn derart große Kraftwerkseinheiten, besonders unter Verwendung von Sattdampfturbinen dieser Größenordnung, können noch nicht als konventionell bezeichnet werden. Durch diese Bezeichnung sollen lediglich die im bisherigen Kraftwerksbau gebräuchlichen Bauelemente und Techniken von den neuartigen Bauelementen und Techniken eines Atomkraftwerkes unterschieden werden.

Der hohe Anteil der Kosten der konventionellen Anlageteile an den Gesamtanlagekosten und die "unkonventionelle" Baugröße dieser Anlageteile macht eine sorgfältige Analyse der Kosten notwendig.

Zu den konventionellen Anlageteilen werden alle Aggregate des Wärmekreises mit Ausnahme der Dampferzeugungseinrichtung, die maschinentechnischen Nebenanlagen, die elektrotechnischen Anlagen sowie die Instrumentierung der Anlageteile gerechnet.

Eine detaillierte Analyse der Kosten dieser Anlageteile ist mit einer ganzen Reihe von Schwierigkeiten verbunden. Gesicherte Kostenangaben für Anlagen > 250 MW_e sind von der deutschen Industrie nicht zu erhalten, da in der Bundesrepublik bisher nur Kraftwerksblöcke von 100 und 150 MW_e in größerer Anzahl gebaut worden sind und einige wenige 200-300 MW_e Blöcke gebaut bzw. geplant werden. Außerdem handelt es sich, mit Ausnahme der Kraftwerksanlage des Atomkraftwerkes in Gundremmingen (KRB), um Heißdampfanlagen.

Eine ins Detail gehende Untersuchung der Kosten der Aggregate des Wärmekreislaufes unabhängig von dem speziellen Entwurf eines Kraftwerkes ist unmöglich, da gerade der Wärmekreislauf sozusagen eine "Maßanfertigung" darstellt.

Ähnliches gilt für die maschinentechnischen Nebenanlagen, die elektrotechnischen Anlagen und die Instrumentierung.

Wegen der oben angeführten Schwierigkeiten wird in den folgenden Abschnitten aus den uns zugänglichen Kostenangaben die Tendenz des Kostenverlauf in Abhängigkeit von der Leistung für einige Anlagenkomplexe geschätzt. Diese "summarische" Behandlungsmethode genügt für überschlägige Kostenschätzungen. Aber erst durch eine differenziertere Kostenanalyse könnte der notwendige Einblick in die Kostenstruktur dieses kostenmäßig dominierenden Anlageteils gewonnen werden, der zu Aussagen über mögliche Einsparungen und Verbesserungen befähigen würde.

3.3.2.1 Die Anlagekosten des Turbo-Generator-Satzes

Die Anlagekosten des Turbo-Generator-Satzes enthalten die Kosten der Turbine, des Generators, der Erregermaschine und der Kondensatoren.

Eine eingehende Untersuchung der Kosten dieses Anlagenkomplexes müßte in Abhängigkeit von der Bauart, der Drehzahl und dem Bauaufwand, d.h. Abhängig von Stufen- und Flutenzahl der Turbine, Kühlwassertemperatur usw., erfolgen.

Eine derart gründliche Untersuchung war bei den uns vorliegenden wenigen und wenig spezifizierten Angaben nicht möglich.

Die erste Abschätzung der Kosten erfolgte anhand der in Abb. 3.3.21.1 dargestellten "spez. Preise von Sattedampf-Turbosätzen deutscher Hersteller", die uns das RWE (Rhein.-Westf. Elektrizitätswerk AG) zur Verfügung stellte. Eine lineare Extrapolation in Abb. 3.3.21.2 mit Hilfe der Fehlerquadratmethode ergibt für $N > 100 \text{ MW}_e$

$$\frac{K_T}{[\text{DM}]} = 4,9 \cdot 10^4 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 7,05 \cdot 10^6 \quad 3.3.21.1$$

Die doppeltlogarithmische Darstellung (Abb. 3.3.21.3) läßt sich durch folgende Gleichungen wiedergeben

$$K_T = K_{T_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.21.2$$

mit

$$N_0 = 400 \text{ MW}_e$$

$$K_{T_0} = 26,65 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$m = 0,66 \quad \text{im Bereich } 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 400 \text{ MW}_e$$

$$m = 0,77 \quad \text{im Bereich } 400 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

Aufgrund dieser Werte wurde der Degressionsexponent des gesamten konventionellen Kraftwerksteiles zur Verwendung in Abschn. 3.2.1 auf

$$m = 0,7$$

geschätzt (s. Abschn. 3.2 Gleichung 3.2.1 Seite 54).

Aus Hersteller- Untersuchungen geht hervor, daß eine 1500-tourige

600 MW_e-Turbo-Generator-Anlage etwa $43 \cdot 10^6$ DM und eine 3000-tourige 600 MW_e-Anlage etwa $33 \cdot 10^6$ DM kosten wird. Nimmt man weiter eine Angabe von $25 \cdot 10^6$ DM für eine 1500-tourige 250 MW_e-Anlage zu Hilfe und unterstellt, daß beide Angaben für die 1500-tourige Ausführung im doppelt-logarithmischen Netz (Abb. 3.3.21.4) durch eine Gerade verbunden werden dürfen, dann ergibt sich folgender Degressionsexponent

$$m = \frac{\lg \frac{43}{25}}{\lg \frac{600}{250}} = 0,6195 \approx 0,62 .$$

Der Degressionsexponent für 3000-tourige Anlagen soll dementsprechend auf

$$m = 0,6$$

geschätzt werden.

In Abb. 3.3.21.4 und 5 ist der Kostenverlauf im doppelt-logarithmischen und im linearen Netz dargestellt.

Die Potenzdarstellung der Abb. 3.3.21.4 kann im Bereich

$$100 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

durch die Gleichungen

$$K_T = K_{T_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.21.3$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$m = 0,62$$

$$K_{T_0} = 43 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

für $n = 1500 \text{ min}^{-1}$

$$m = 0,6$$

$$K_{T_0} = 33 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

für $n = 3000 \text{ min}^{-1}$

wiedergegeben werden.

Im folgenden wird angenommen, daß dies die Kosten ab Werk, d.h. die Kosten ohne Transport und Montage darstellen. Die Berücksichtigung der Kosten für Transport und Montage soll durch einen prozentualen Zuschlag zu den Kosten ab Werk erfolgen. Dabei wird außerdem ange-

nommen, daß diese Kosten einen kleineren Degressionsexponenten als die Kosten des Turbo-Generator-Satzes aufweisen, d.h. daß der prozentuale Anteil dieser Kosten an den Kosten des Turbo-Generator-Satzes mit kleiner werdender Auslegungsleistung wächst. Der Degressionsexponent wird auf

$$m_1 = 0,5$$

und die Transport- und Montagekosten werden für einen 600 MW_e-Satz auf ca. 10 % der Kosten des Satzes geschätzt.

Damit ergeben sich die Gesamtkosten des Turbo-Generator-Satzes zu:

$$\begin{aligned} K_{T,G} &= K_{T_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^m + p_0 K_{T_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{m_1} \\ &= K_{T_0} \left(\frac{N}{N_0}\right) \left[1 + p_0 \left(\frac{N}{N_0}\right)^{m_1 - m} \right] \end{aligned} \quad 3.3.21.4$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$p_0 = 0,1$$

$$m_1 = 0,5$$

$$m = 0,62$$

$$K_{T_0} = 43 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{für } n = 1500 \text{ min}^{-1}$$

$$m = 0,6$$

$$K_{T_0} = 33 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{für } n = 3000 \text{ min}^{-1}$$

Bei den uns zur Verfügung stehenden Angaben über die Anlagekosten von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren der SSW ist zu berücksichtigen, daß die 1500-tourige Turbinenanlage mit einfacher Zwischenüberhitzung betrieben wird. Der zusätzliche Aufwand für die Zwischenüberhitzung betrage für eine 600 MW_e - Anlage schätzungsweise 7 % der Anlagekosten des Turbo-Generator-Satzes; der Degressionsexponent betrage 0,5. Die Kosten einer Anlage mit einfacher Zwischenüberhitzung lassen sich mit Gleichung 3.3.21.4 berechnen, wenn man folgende Werte einsetzt:

$$\begin{array}{rcl}
 N_0 & = & 600 \text{ MW}_e \\
 p_0 & = & 0,17 \\
 m_1 & = & 0,5 \\
 m & = & 0,62 \\
 K_{T_0} & = & 43 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \left. \begin{array}{l} \text{für } n = 1500 \text{ min}^{-1} \\ \text{für } n = 3000 \text{ min}^{-1} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{mit ein-} \\ \text{facher Zwi-} \\ \text{schenüber-} \\ \text{hitzung} \end{array} \\
 m & = & 0,6 \\
 K_{T_0} & = & 33 \cdot 10^6 \text{ DM}
 \end{array}$$

In Abb. 3.3.21.6 sind die Gesamtkosten von 1500-tourigen Anlagen mit und ohne Zwischenüberhitzung nach Gleichung 3.3.21.4 über der Kraftwerksnettoleistung aufgetragen. Der Kostenverlauf läßt sich im Bereich $200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$ näherungsweise auch durch die Gleichungen

$$K_{T,G} = K_{T,G_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.21.5$$

mit

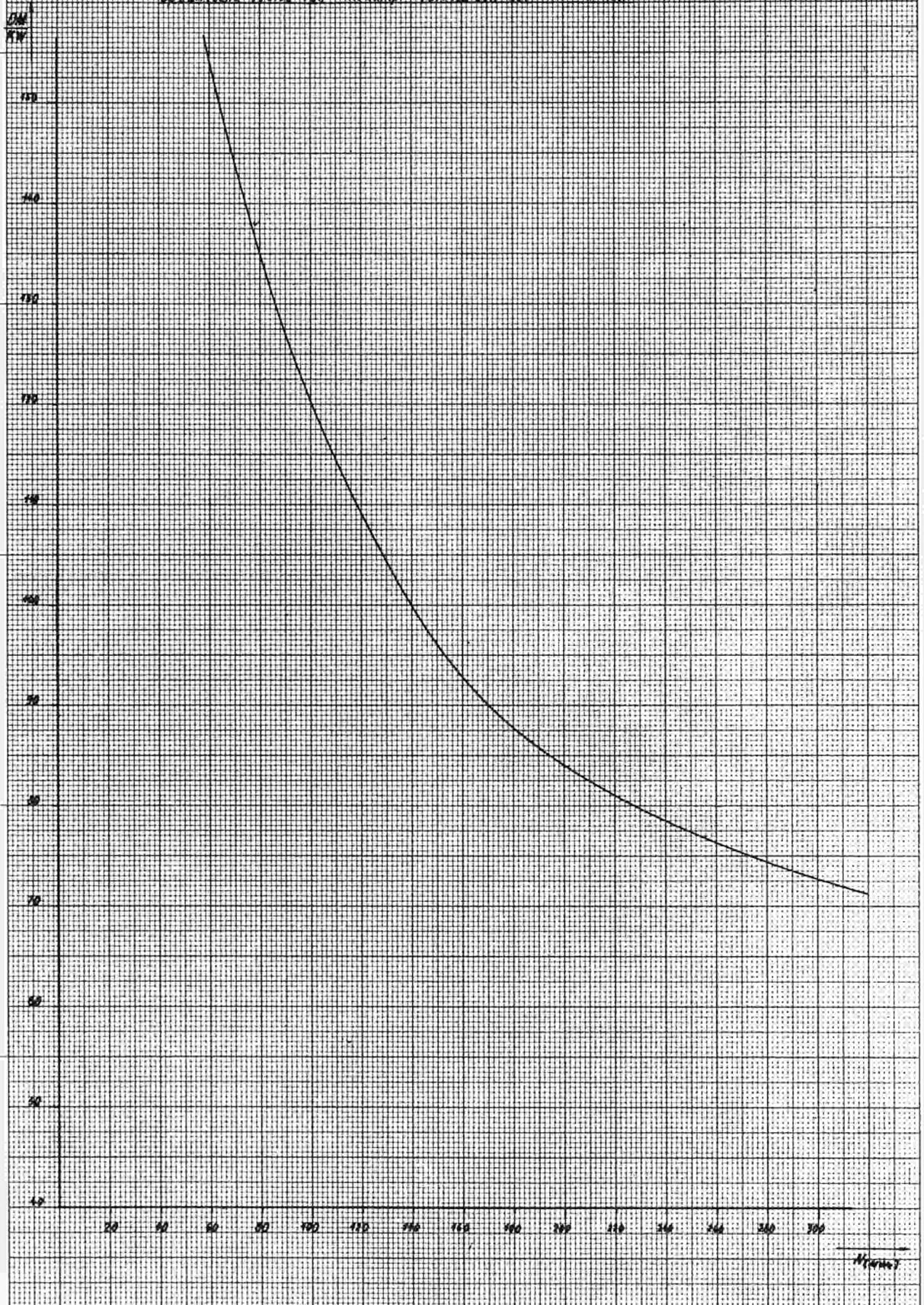
$$\begin{array}{rcl}
 N_0 & = & 600 \text{ MW}_e \quad n = 1500 \text{ min}^{-1} \\
 m & = & 0,6 \quad \text{ohne Zwischen-} \\
 K_{T,G_0} & = & 47,3 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{überhitzung} \\
 m & = & 0,61 \quad \text{mit Zwischen-} \\
 K_{T,G_0} & = & 50,3 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{überhitzung}
 \end{array}$$

darstellen.

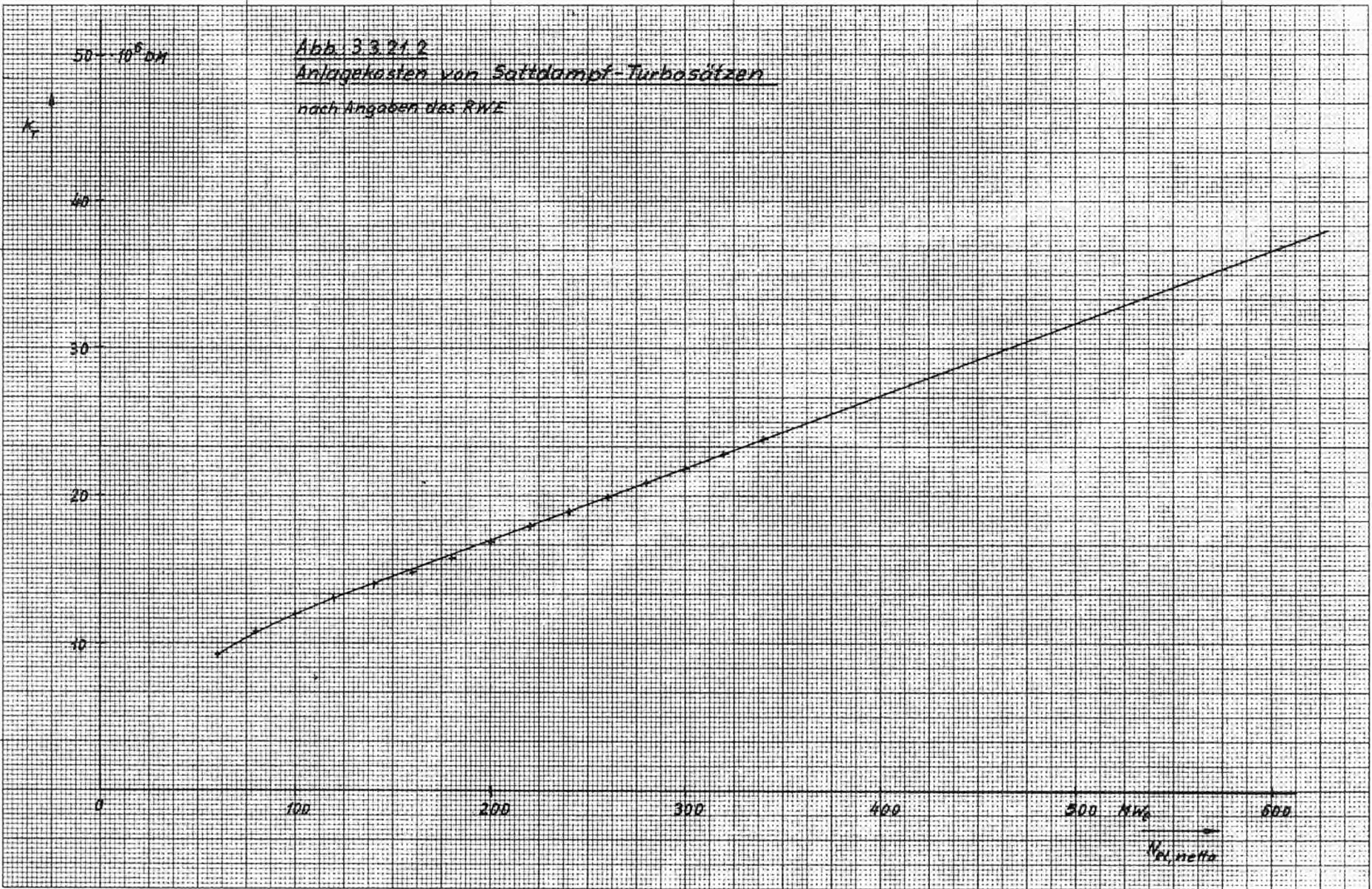
In Abb. 3.3.21.7 sind die spez. Anlagekosten für Sattedampf-Turbo-Generator-Sätze, wie sie sich aus den Abschätzungen in diesem Abschnitt ergeben, zum Vergleich in einem Diagramm zusammen dargestellt.

Abb. 3.3.27.1

Spezifische Preise von Saldampf-Turbinen deutscher Hersteller



Werner



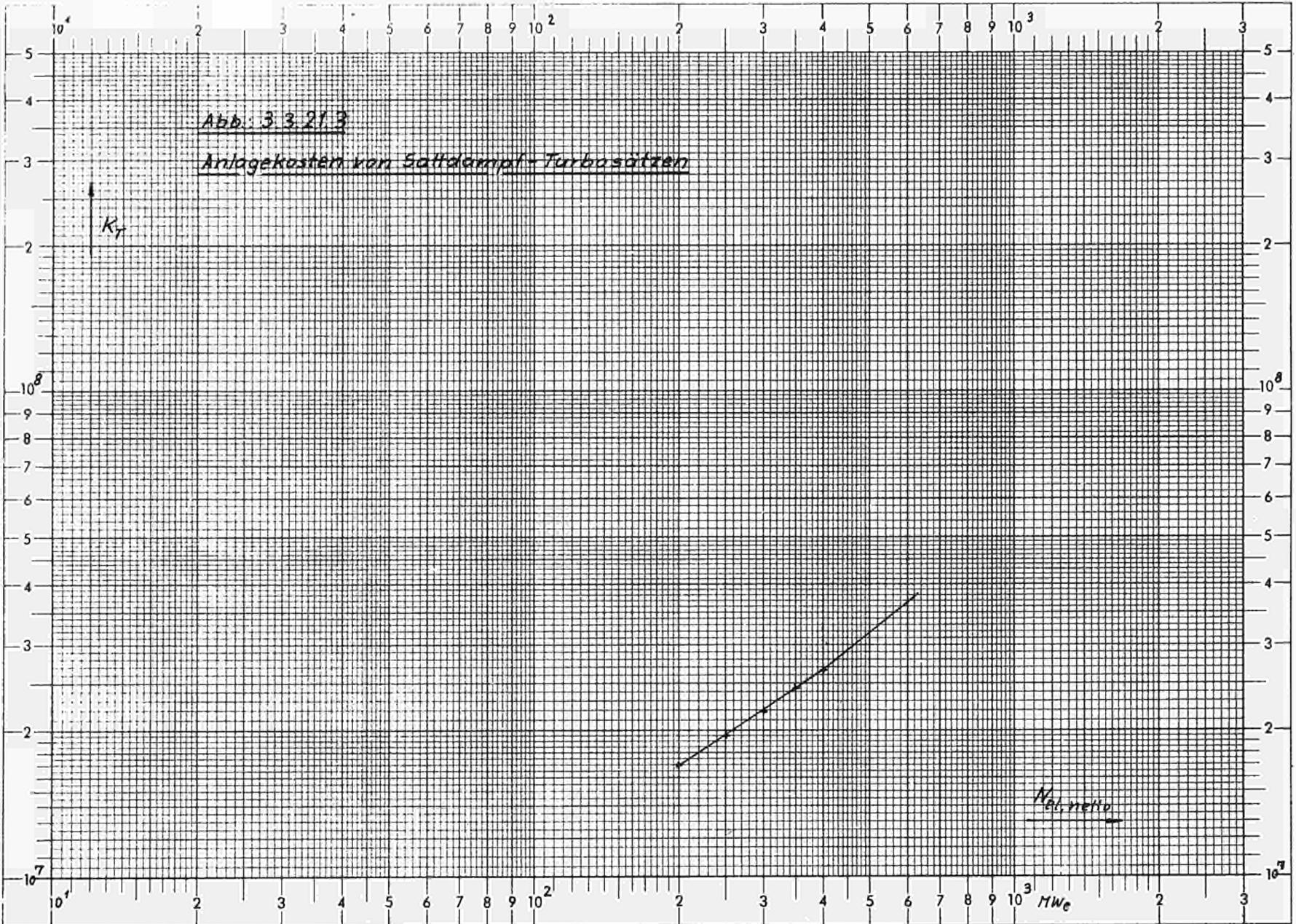


Abb. 3.3.21.3

Anlagekosten von Saturated-Turbosätzen

K_T

N_e netto

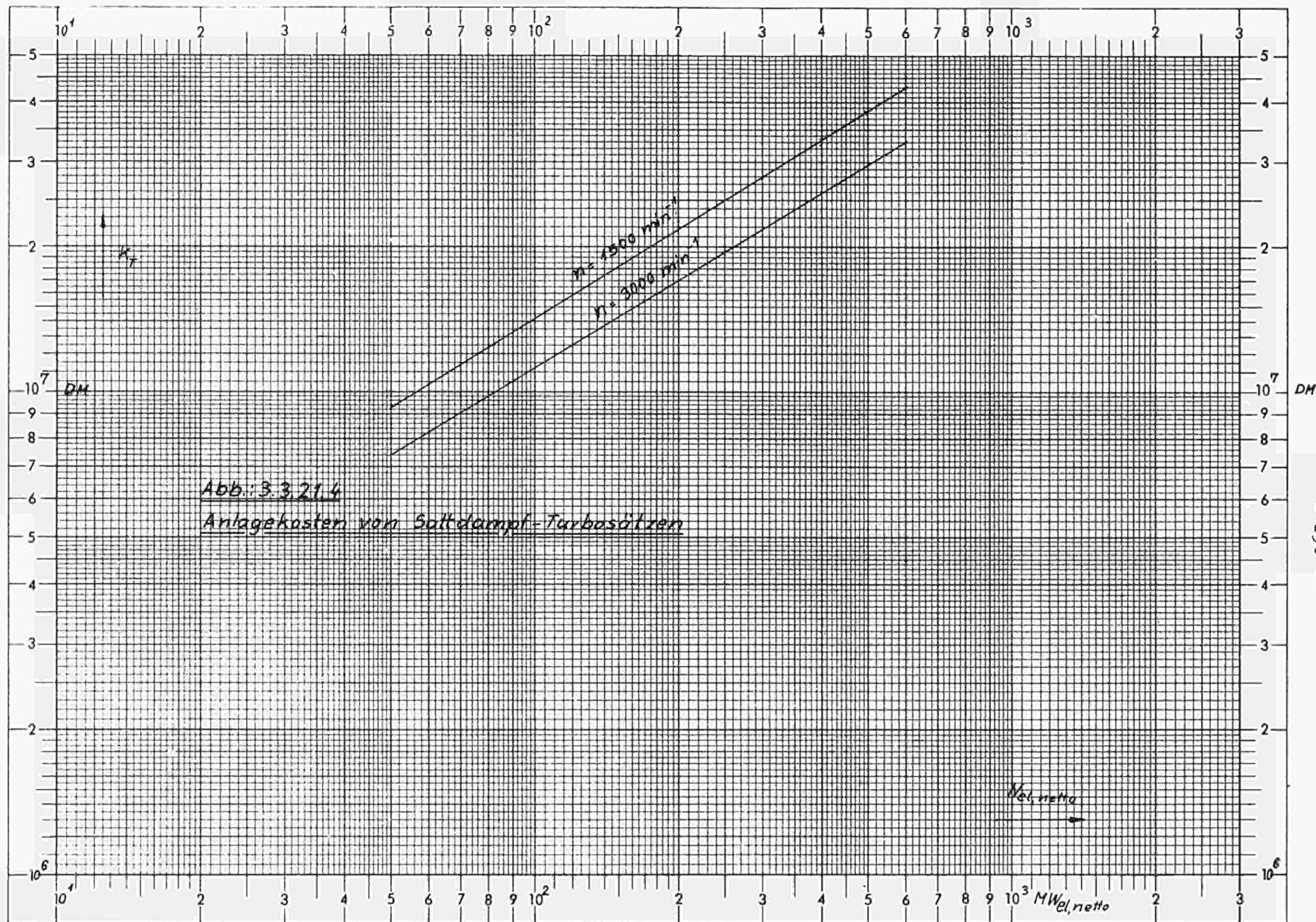


Abb.: 3.3.21.4
 Anlagekosten von Saltdampf-Turbinen

$50 \cdot 10^6 \text{ DM}$

Abb. 3.3.21.5
Anlagekosten von Saltdampf-Turbosätzen

K_T

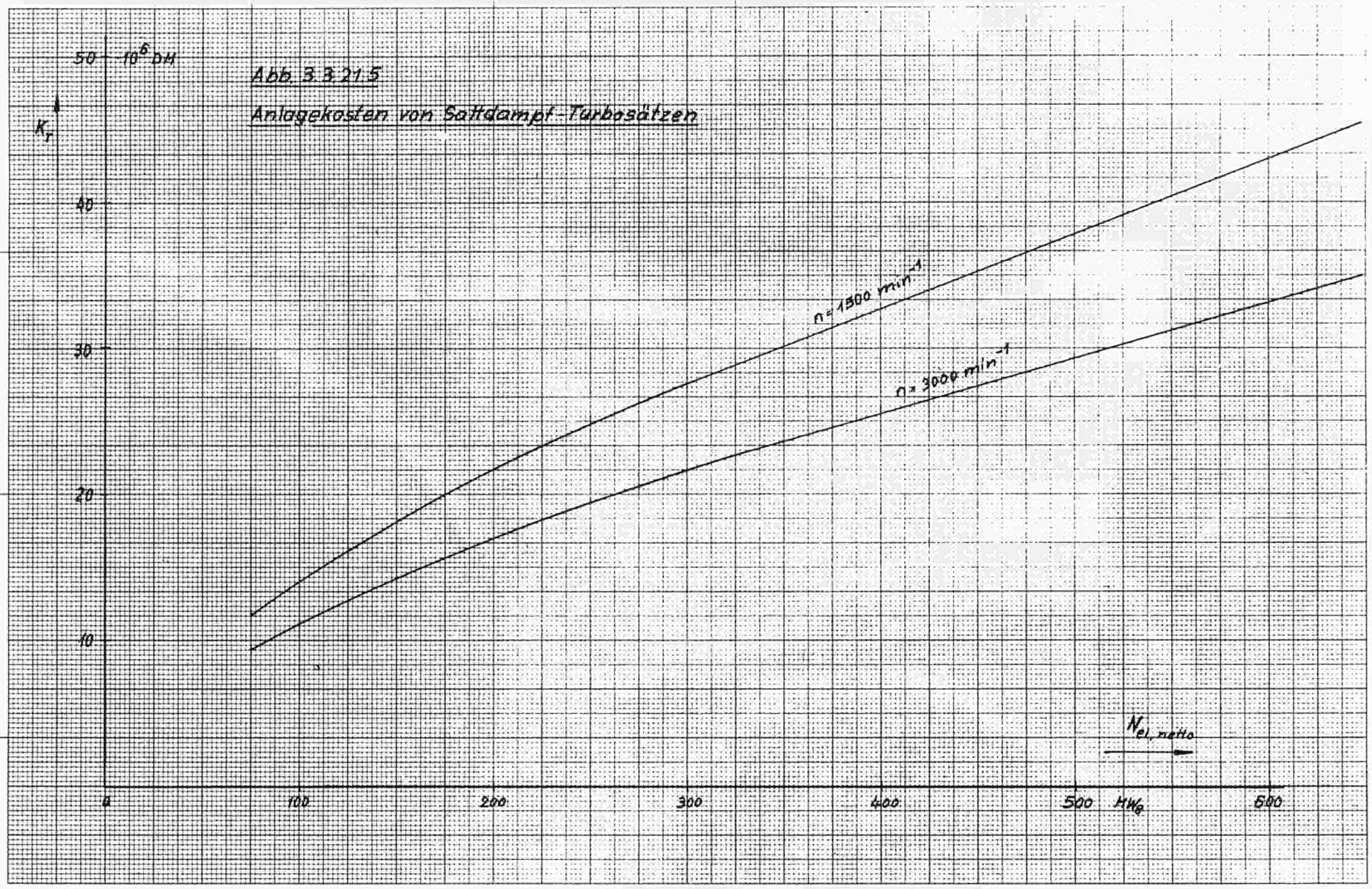
50
40
30
20
10

0 100 200 300 400 500 600 MW_e

$n = 1500 \text{ min}^{-1}$

$n = 3000 \text{ min}^{-1}$

$N_{el, netto}$



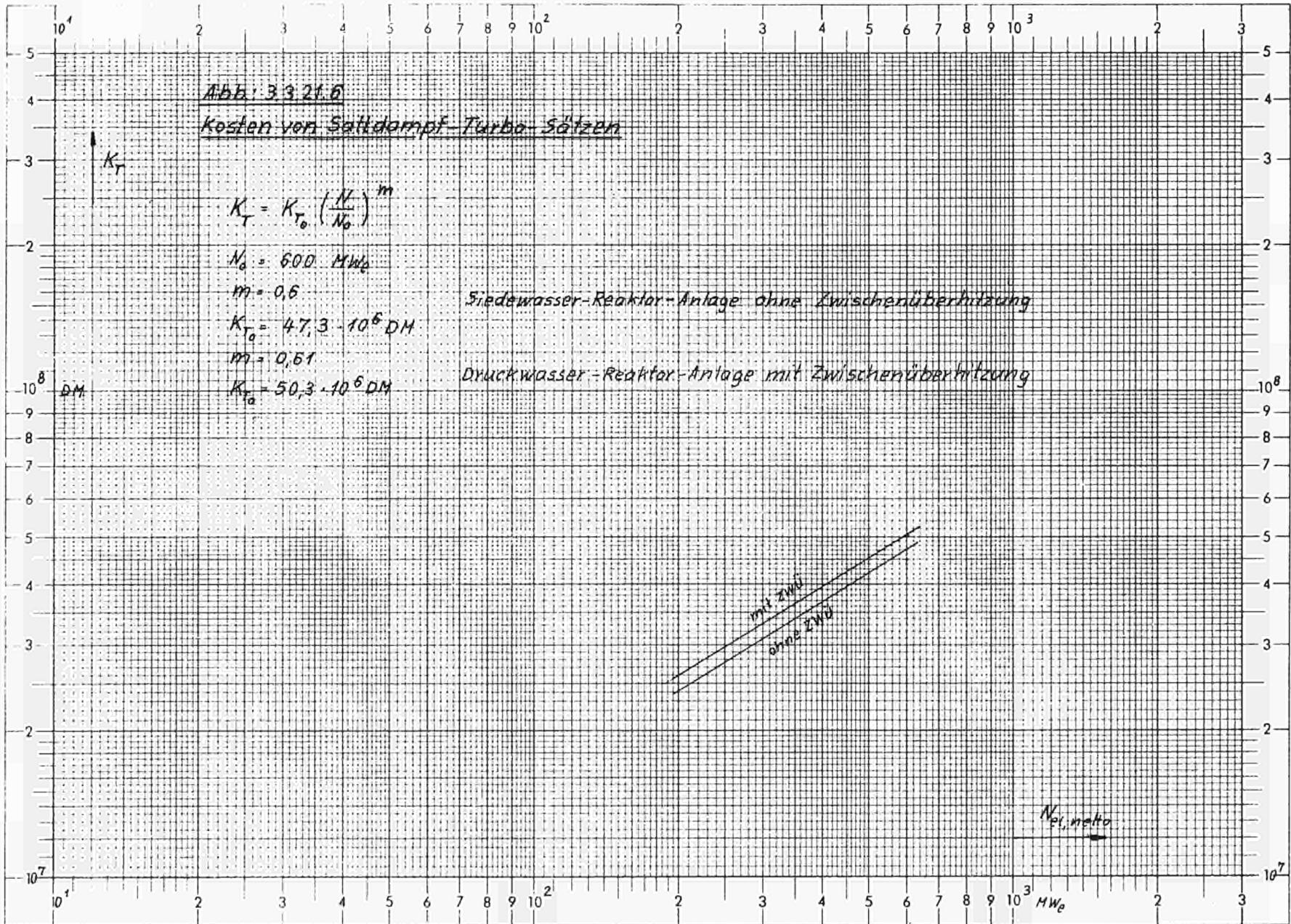
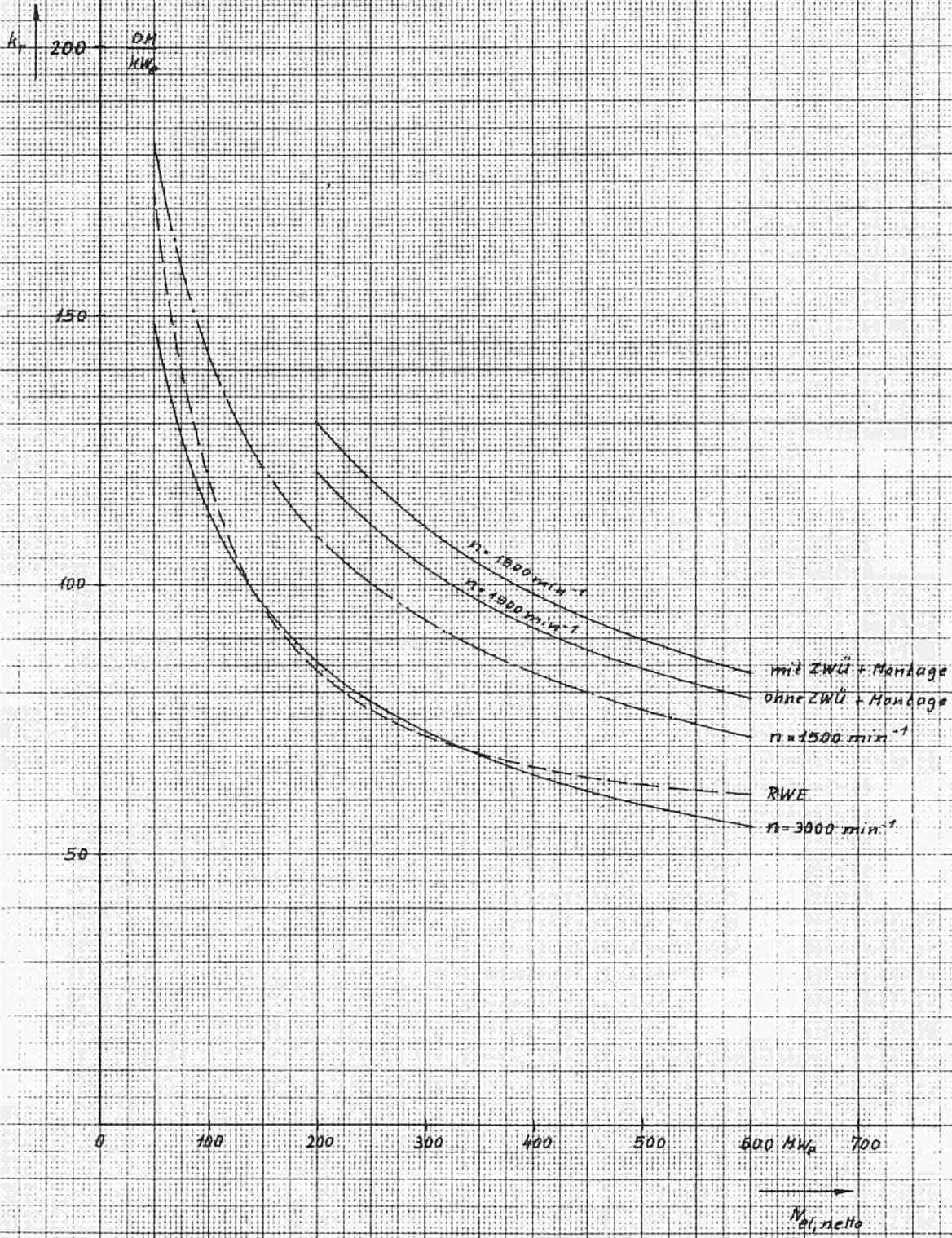


Abb. 3.3.217

spez. Anlagekosten von Saturated-Turbosätzen



3.3.2.2 Die Anlagekosten der Rohrleitungen, Armaturen, Vorwärmer und Pumpen

In diesem Kostenkomplex sind die ganzen restlichen Aggregate des Wärmekreises sowie die Rohrleitungen und Armaturen des konventionellen Kraftwerksteiles zusammengefaßt. Eine ausführliche Untersuchung ist ohne die Kenntnis des speziellen Aufbaus eines Kraftwerkes unmöglich. Die Zahl der Vorwärmstufen und die Zahl der parallelen Vorwärmstränge ist von Kraftwerk zu Kraftwerk verschieden und hängt im wesentlichen von den Optimierungsrechnungen und dem Konzept des Erbauers oder den Wünschen des Betreibers ab.

Für die vorliegende Studie sollen die Kosten dieses Komplexes und ihr Verlauf in Abhängigkeit von der Leistung anhand der vorliegenden Angaben geschätzt werden. Aus den Angaben der Herstellerfirmen ist zu entnehmen, daß die Aufwendungen für diese Anlageteile zwischen 8 % und 8,5 % der gesamten direkten Anlagekosten liegen. Der größte Teil dieser Kosten, etwa 6 ... 7 % der gesamten direkten Anlagekosten, geht zu Lasten der Rohrleitungen und Armaturen. Legt man die Kosten von $276 \cdot 10^6$ DM für eine 600 MW_e Anlage zugrunde, dann ergibt sich

$$\begin{aligned} K_{R,V} &= (0,08 \dots 0,085) 276 \cdot 10^6 \\ &= (22,08 \dots 23,46) \cdot 10^6 \text{ DM} \end{aligned}$$

Als Kosten für eine 600 MW_e -Anlage wird daraus der Wert von

$$K_{R,V} = 23 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

gewählt.

Der Kostenverlauf wird sich im wesentlichen nach dem Verlauf der Rohrleitungskosten richten.

Nimmt man an, daß die Kosten der Rohrleitungen näherungsweise ihrem Gewicht proportional sind,

$$K \sim G \sim D \cdot s \cdot L$$

K = Kosten

G = Gewicht

D = mittlerer Durchmesser

s = Wandstärke

L = Länge

daß gleiche Auslegungsdrücke und gleiche Temperaturen vorliegen und daß gleiche Werkstoffe verwendet werden, d.h.

$$\frac{s}{D} = \text{const.},$$

dann ist

$$K \sim \frac{s}{D} D^2 L \sim D L.$$

Von einer gewissen Baugröße an kann außerdem angenommen werden, daß sich die Länge L der Rohrleitungen nur noch unwesentlich mit der Leistung ändert, so daß die Kosten näherungsweise dem Quadrat des Durchmessers proportional sind.

$$K \sim D^2$$

Andererseits ist die Kraftwerksleistung den Massenströmen proportional, und diese sind bei gleichen Geschwindigkeiten dem Rohrquerschnitt proportional, so daß gilt

$$N \sim D^2.$$

Daraus ergibt sich

$$K \sim N.$$

Die Kosten der Rohrleitungen sind also näherungsweise proportional der Leistung. Berücksichtigt man, daß in dem ganzen Kostenkomplex auch Kosten mit degressiver Tendenz, wie z.B. Montagekosten, Kosten für Pumpen und Vorwärmer usw., enthalten sind, die Rohrleitungskosten jedoch dominieren, so erscheint ein Degressionsexponent von

$$m = 0,85$$

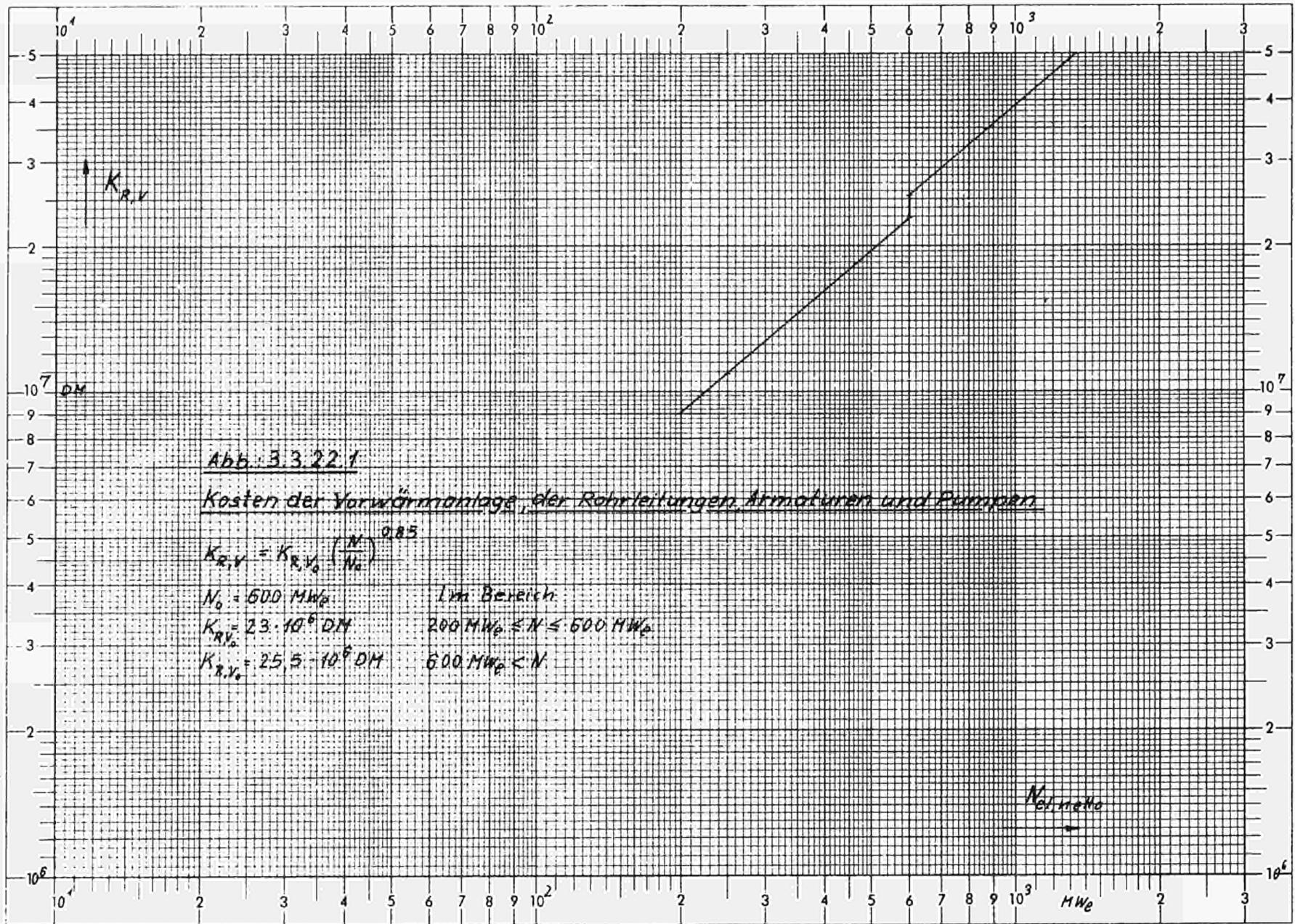
gerechtfertigt.

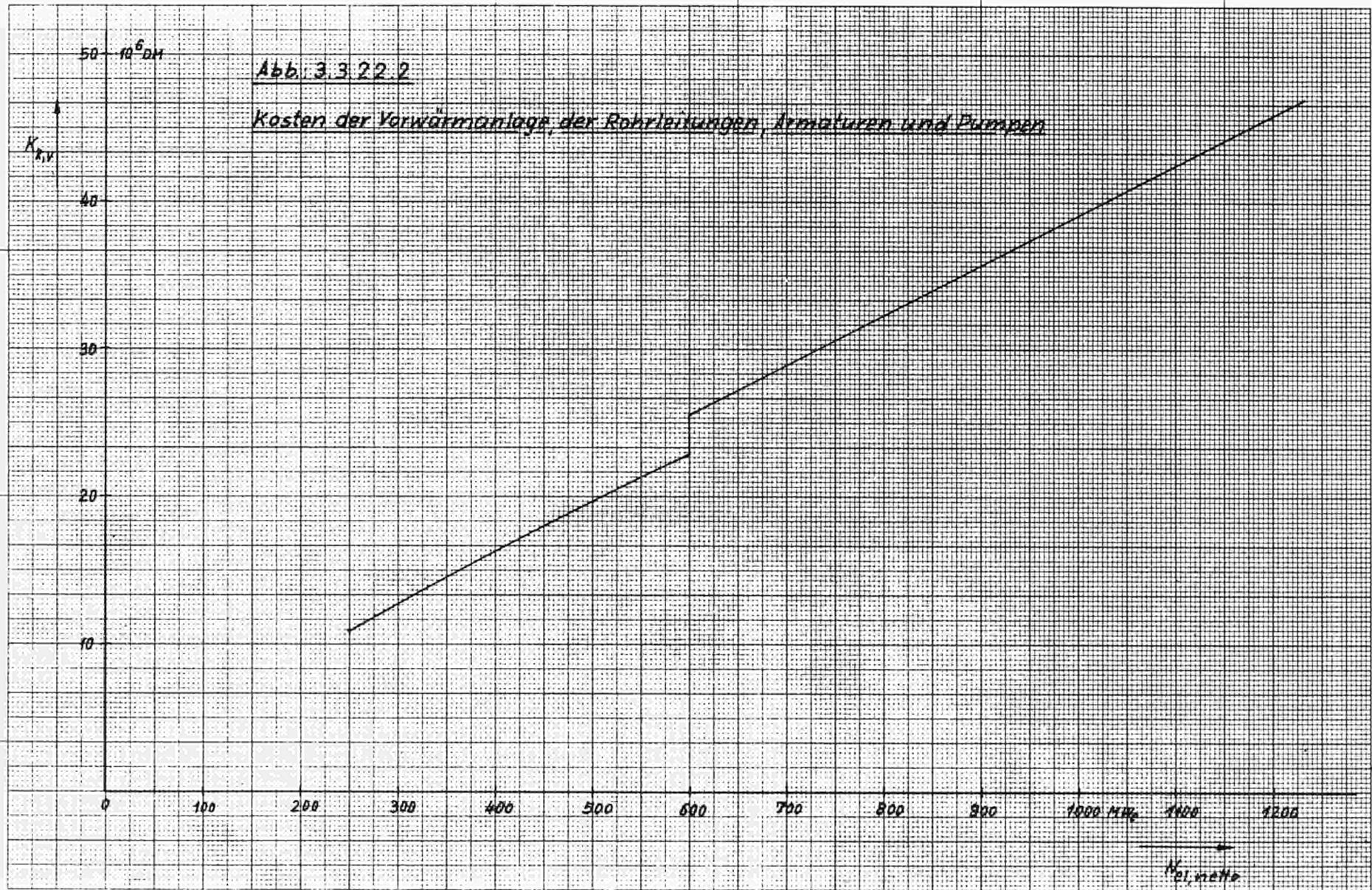
Der Kostenverlauf mit diesen Parametern ist in Abb. 3.3.22.1 und Abb. 3.3.22.2 dargestellt. Durch die Verdoppelung der Turbinenzahl für Leistungen größer 600 MW_e wird auch eine doppelte Auslegung des Wärmekreises erforderlich. Diese Tatsache ist durch einen Kostensprung bei 600 MW_e berücksichtigt. Die Höhe dieses Sprunges ergibt sich als Differenz der Aufwendungen für zwei 300 MW_e-Anlagen und der Aufwendungen für eine 600 MW_e-Anlage.

$$K_{R,V} = K_{R,V_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,85} \quad 3.3.22.1$$

mit

$$\begin{aligned} N_0 &= 600 \text{ MW}_e && \text{im Bereich} \\ K_{R,V_0} &= 23 \cdot 10^6 \text{ DM} && 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e \\ K_{R,V_0} &= 25,5 \cdot 10^6 \text{ DM} && 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e \end{aligned}$$





3.3.2.3 Die Kosten der Kondensatreinigungsanlage

Nach Firmenangaben kostet die Kondensatreinigungsanlage eines 600 MW_e - Kraftwerkes mit Siedewasserreaktor etwa 1,1 % der gesamten direkten Anlagekosten. Mit den geschätzten Kosten von $276 \cdot 10^6$ DM für eine 600 MW_e - Anlage ergibt sich

$$K_{K,R_{600}} = 0,011 \cdot 276 \cdot 10^6 = 3,04 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

Der Degressionsexponent wird für den Bereich $200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$ zu

$$m = 0,8$$

geschätzt.

Die Kosten der Kondensatreinigungsanlage für $N > 600 \text{ MW}_e$ ergeben sich aus der Annahme, daß sie wie die Turbo-Sätze doppelt ausgelegt werden.

$$K_{K,R} = K_{K,R_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,8} \quad 3.3.23.1$$

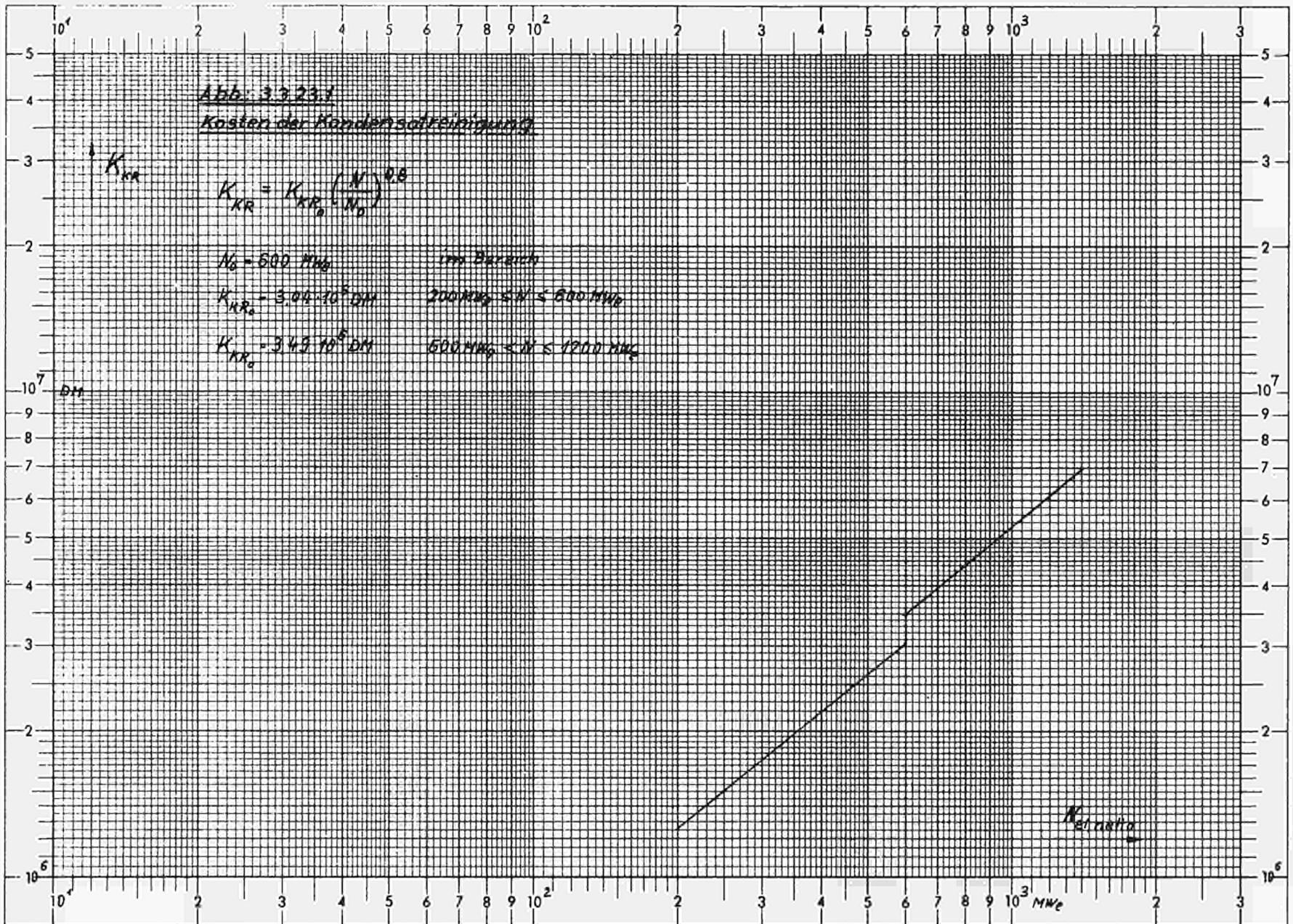
$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{K,R_0} = 3,04 \cdot 10^6 \quad \text{für } 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{K,R_0} = 3,49 \cdot 10^6 \quad \text{für } 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

Der Kostenverlauf ist in Abb. 3.3.23.1 dargestellt.

Für Druckwasserreaktor-Anlagen ist nach Auskunft der SSW keine Kondensatreinigung vorgesehen.



3.3.2.4 Die Kosten der Kühlwasseranlagen

Zu den Kühlwasseranlagen werden im folgenden alle maschinentechnischen Einrichtungen zur Reinigung und Beförderung des Kühlwassers, wie sie bei einer Kühlung mit Flußwasser erforderlich sind, gerechnet. Für eine 600 MW_e - Satttdampfanlage betragen die Kosten der Kühlwasseranlagen ca. 1 % der gesamten direkten Anlagekosten. Mit den Schätzkosten von 276 · 10⁶ DM ergibt das

$$K_{KW_{600}} = 0,01 \cdot 276 \cdot 10^6 = 2,76 \cdot 10^6 \text{ DM .}$$

Als Degressionsexponent in der Umgebung von 600 MW_e wird

$$m = 0,67$$

geschätzt.

Eine lineare Extrapolation in Abb. 3.3.24.2 ergibt für N > 600 MW_e

$$\frac{K_{K,W}}{[\text{DM}]} = 2,92 \cdot 10^3 \frac{N}{[\text{MW}_e]} + 1,008 \cdot 10^6 \quad 3.3.24.1$$

Die in Abb. 3.3.24.1 wiedergegebene doppelt-logarithmische Darstellung kann durch die Gleichungen

$$K_{K,W} = K_{K,W_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.24.3$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{K,W_0} = 2,76 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{für } 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 800 \text{ MW}_e$$

$$m = 0,67$$

und

$$N_0 = 800 \text{ MW}_e$$

$$K_{K,W_0} = 3,35 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{für } 800 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

$$m = 0,73$$

beschrieben werden.

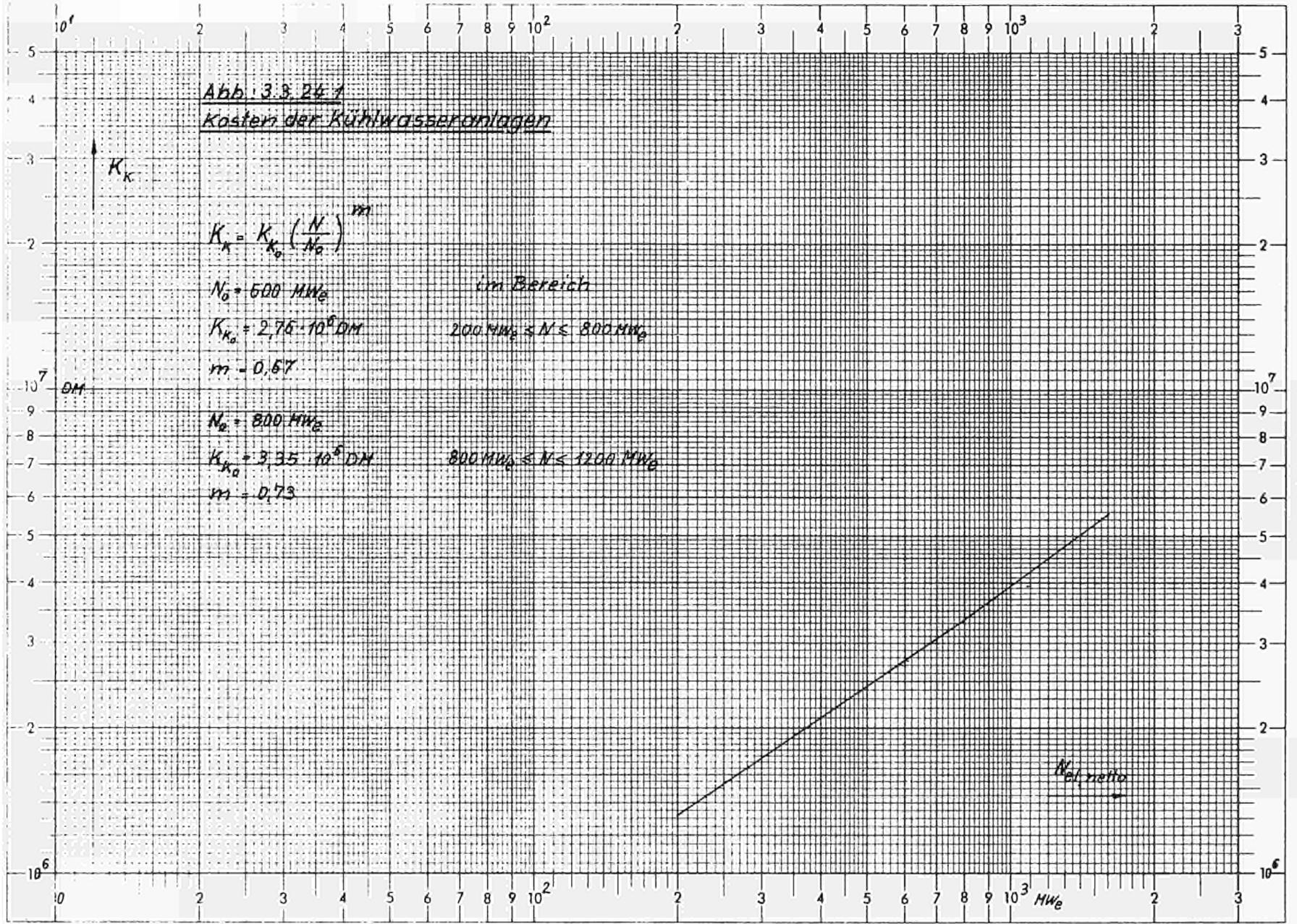
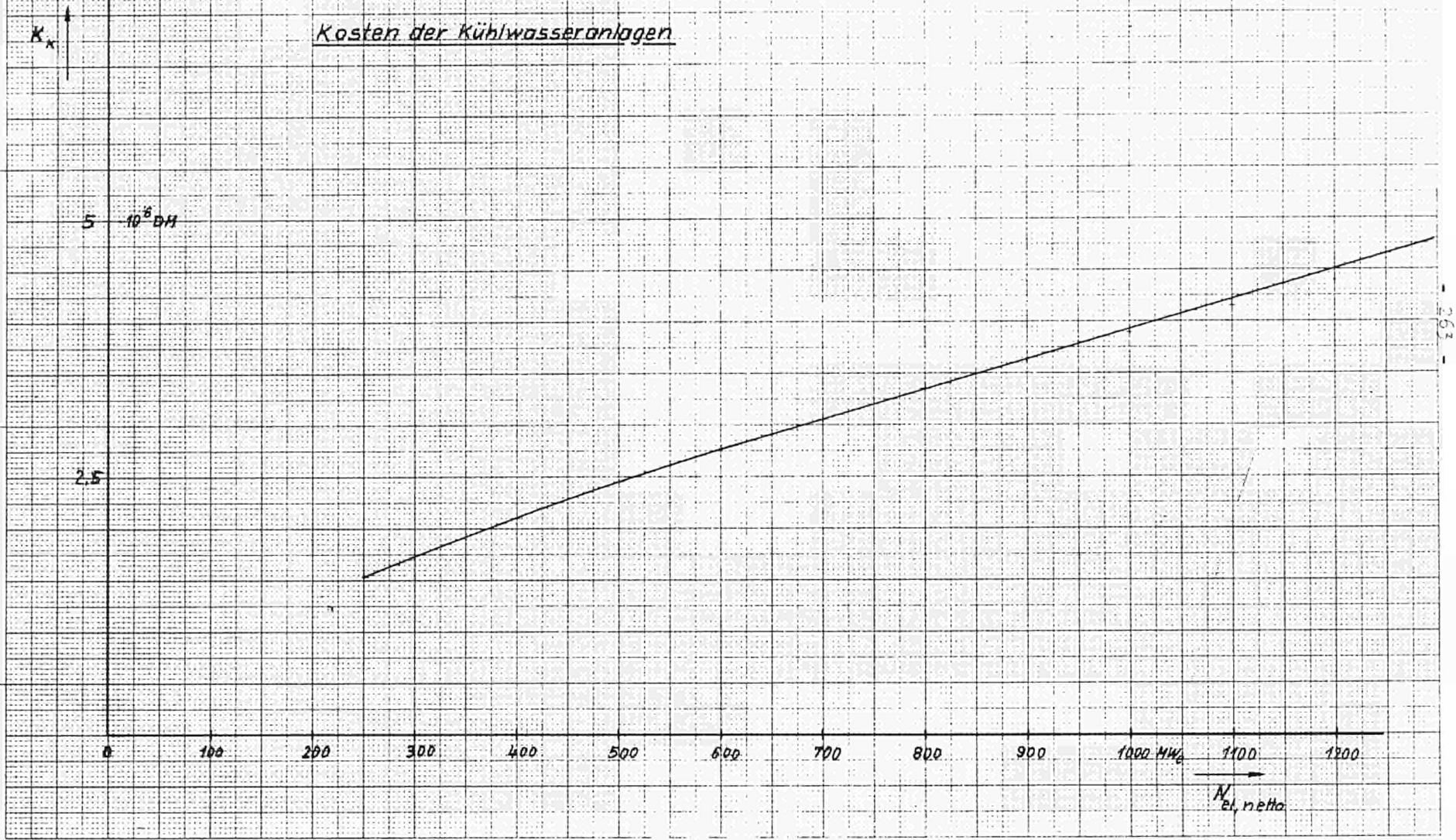


Abb. 3.3.24.2

Kosten der Kühlwasseranlagen



3.3.2.5 Die Kosten der maschinentechnischen Nebenanlagen

Dieser Kostenkomplex enthält die Kosten der Vollentsalzungsanlage, der Kondensatspeicher, der Hebezeuge, die Kosten für Heizungs-, Lüftungs- und Klimaeinrichtungen, sowie die Aufwendungen für die Werkstatt- und Laboreinrichtungen.

Nach Herstellerangaben betragen die Kosten etwa 3...4 Prozent der gesamten direkten Anlagekosten bei einer 600 MW_e-Anlage, also ungefähr

$$\begin{aligned} K_{M,N_{600}} &= (0,03...0,04) \cdot 275 \cdot 10^6 \\ &= (8,28...11,04) \cdot 10^6 \text{ DM} \end{aligned}$$

Als Degressionsexponent in der Umgebung von N = 600 MW_e kann

$$m = 0,6$$

angenommen werden. Die Kosten der maschinentechnischen Nebenanlagen einer 600 MW_e-Anlage werden anhand der oben angeführten Werte auf

$$K_{M,N_{600}} = 11 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

geschätzt.

Eine lineare Extrapolation des mit dem Degressionsexponenten m = 0,6 in der Umgebung von N = 600 MW_e gegebenen Kostenverlaufes im linearen Netz (Abb. 3.3.25.1) ergibt für N > 600 MW_e

$$\frac{K}{\text{DM}} = 1,027 \cdot 10^6 \frac{N}{\text{MW}_e} + 4,84 \cdot 10^6 \quad 3.3.25.1$$

Für die Darstellung im doppelt-logarithmischen Netz (Abb. 3.3.25.2) gelten die Gleichungen

$$K_{M,N} = K_{M,N_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^m \quad 3.3.25.2$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{M,N_0} = 11 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$m = 0,6$$

im Bereich

$$200 \text{ MW}_e \leq N \leq 800 \text{ MW}_e$$

und

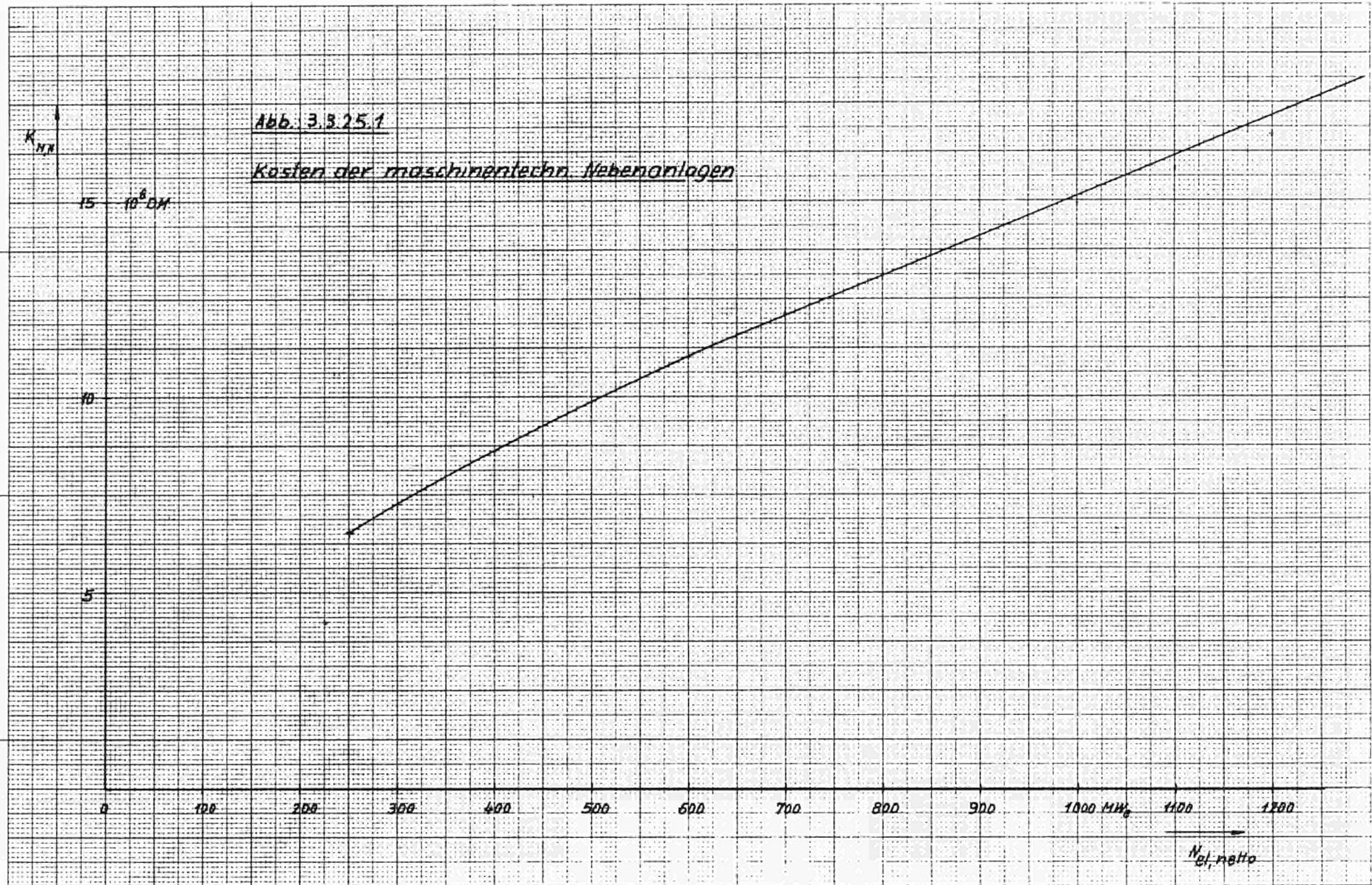
$$N_0 = 800 \text{ MW}_e$$

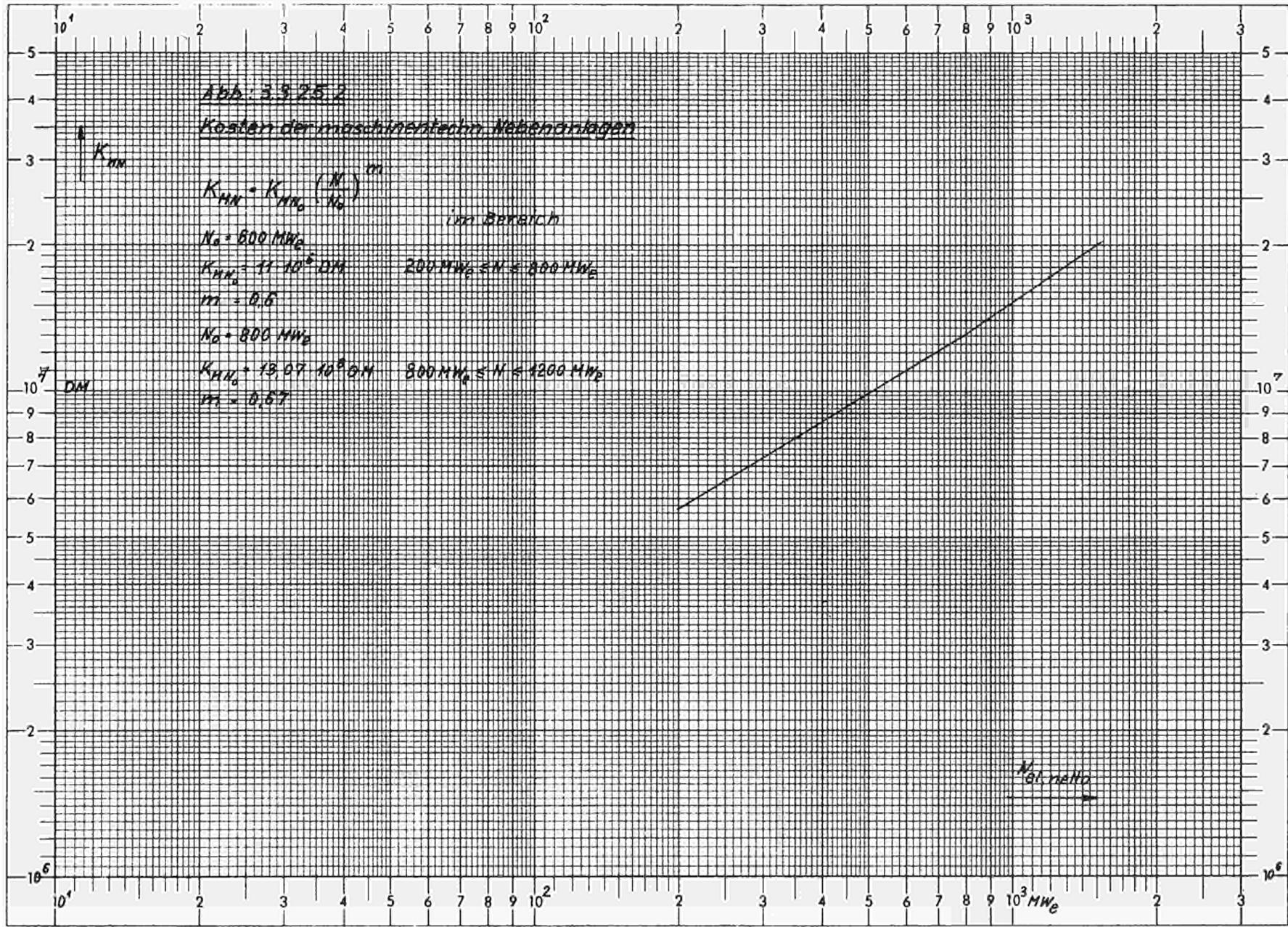
$$K_{M,N_0} = 13,07 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$m = 0,67$$

im Bereich

$$800 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$$





3.3.2.6 Die Anlagekosten der elektrotechnischen Anlagen des konventionellen Kraftwerksteiles

Zu den hier behandelten elektrotechnischen Anlagen zählen die Maschinentransformatoren und die gesamte elektrotechnische Ausrüstung des konventionellen Anlagenteiles mit Ausnahme der Instrumentierung. Die Aufwendungen für diese Anlageteile betragen bei einer 600 MW_e - Anlage etwa 8 % der gesamten direkten Anlagekosten. Etwa 50 % dieser Summe wird für die Maschinen-Transformatoren benötigt. Die spez. Kosten von Maschinen-Transformatoren dieser Größenordnung betragen nach Angaben des RWE

$$k_{\text{TR}} = 15 \text{ DM/kVA} = \text{const.} \quad 3.3.26.1$$

und sind ziemlich unabhängig von der Leistung.

Zum Betrieb eines Kraftwerkes werden drei einpolige Maschinen-Transformatoren je Turbo-Generator-Satz benötigt. Häufig wird noch ein vierter für eventuelle Ausfälle in Reserve gehalten. Innerhalb dieser Studie kann mit drei Maschinen-Transformatoren je Turbo-Generator-Satz gerechnet werden. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich - mit Gleichung 3.3.26.1 - die spez. Kosten der Maschinen-Transformatoren bezogen auf die Kraftwerksnennleistung zu

$$k_{\text{TR}} \approx 19 \text{ DM/kW} = \text{const.} \quad 3.3.26.1a$$

Dieser Wert entspricht in etwa den Herst.- Angaben, nach denen die spez. Kosten ca. 20 DM/kW betragen.

Für die Kosten der gesamten elektrotechnischen Ausrüstung einer 600 MW_e - Anlage ergibt sich unter Zugrundelegung von $276 \cdot 10^6 \text{ DM}$ für die direkten Anlagekosten und dem oben erwähnten Prozentsatz von 8 %

$$K_{\text{EA}600} = 0,08 \cdot 276 \cdot 10^6 = 22,08 \cdot 10^6 \approx 22 \cdot 10^6 \text{ DM.}$$

Der Degressionsexponent wird auf

$$m = 0,66$$

geschätzt.

Berücksichtigt man, daß bei der Verwendung von 2 Turbo-Generator-Sätzen für $N > 600 \text{ MW}_e$ auch ein großer Teil der elektrotechnischen Ausrüstung doppelt benötigt wird, dann läßt sich der Kostenverlauf (Abb. 3.3.26.3) durch die Gleichungen

$$K_{E,A} = K_{E,A_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,66} \quad 3.3.26.2$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

im Bereich

$$K_{E,A_0} = 22 \cdot 10^6$$

$$200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{E,A_0} = 27,85 \cdot 10^6$$

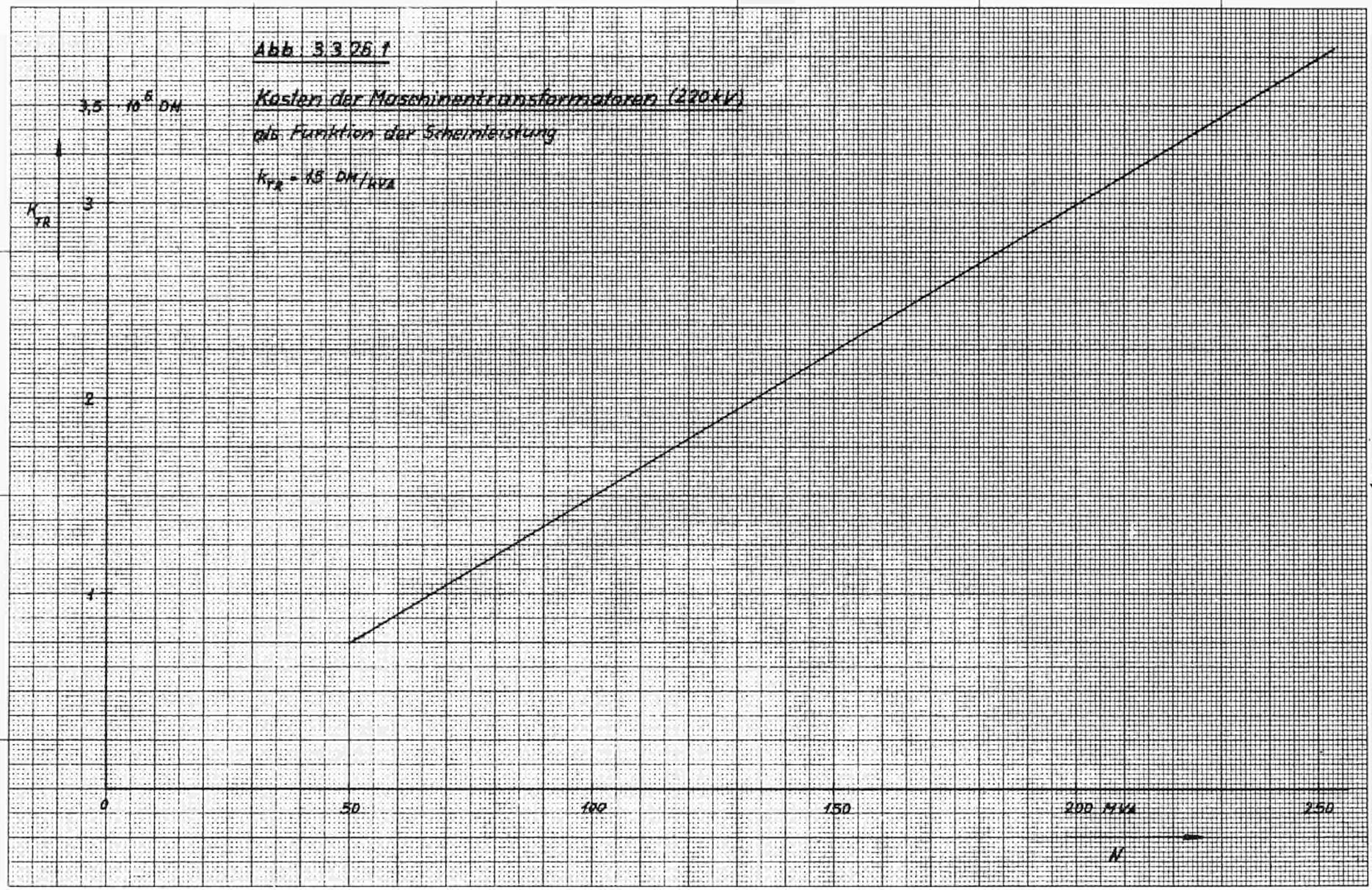
$$600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

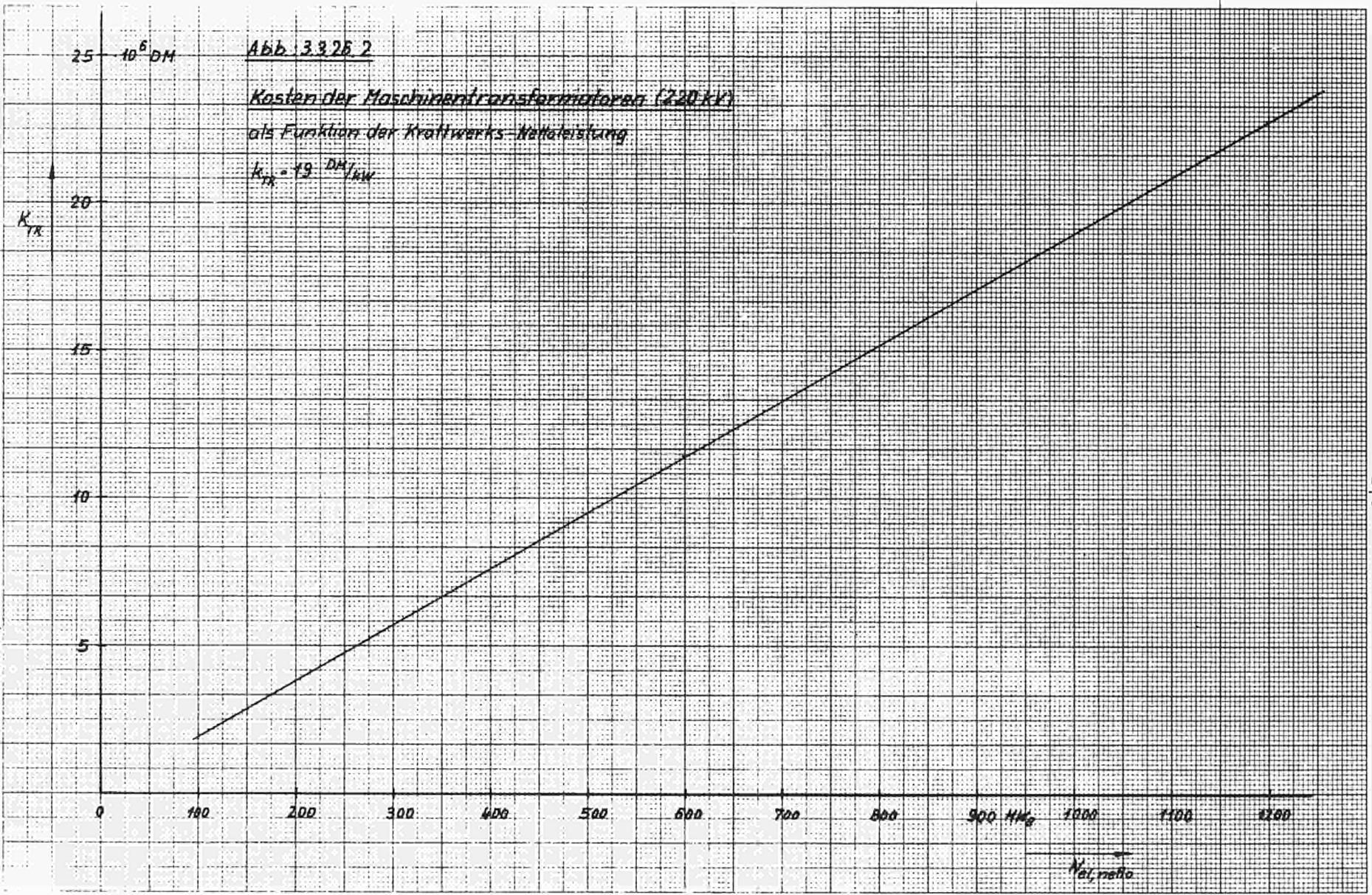
darstellen.

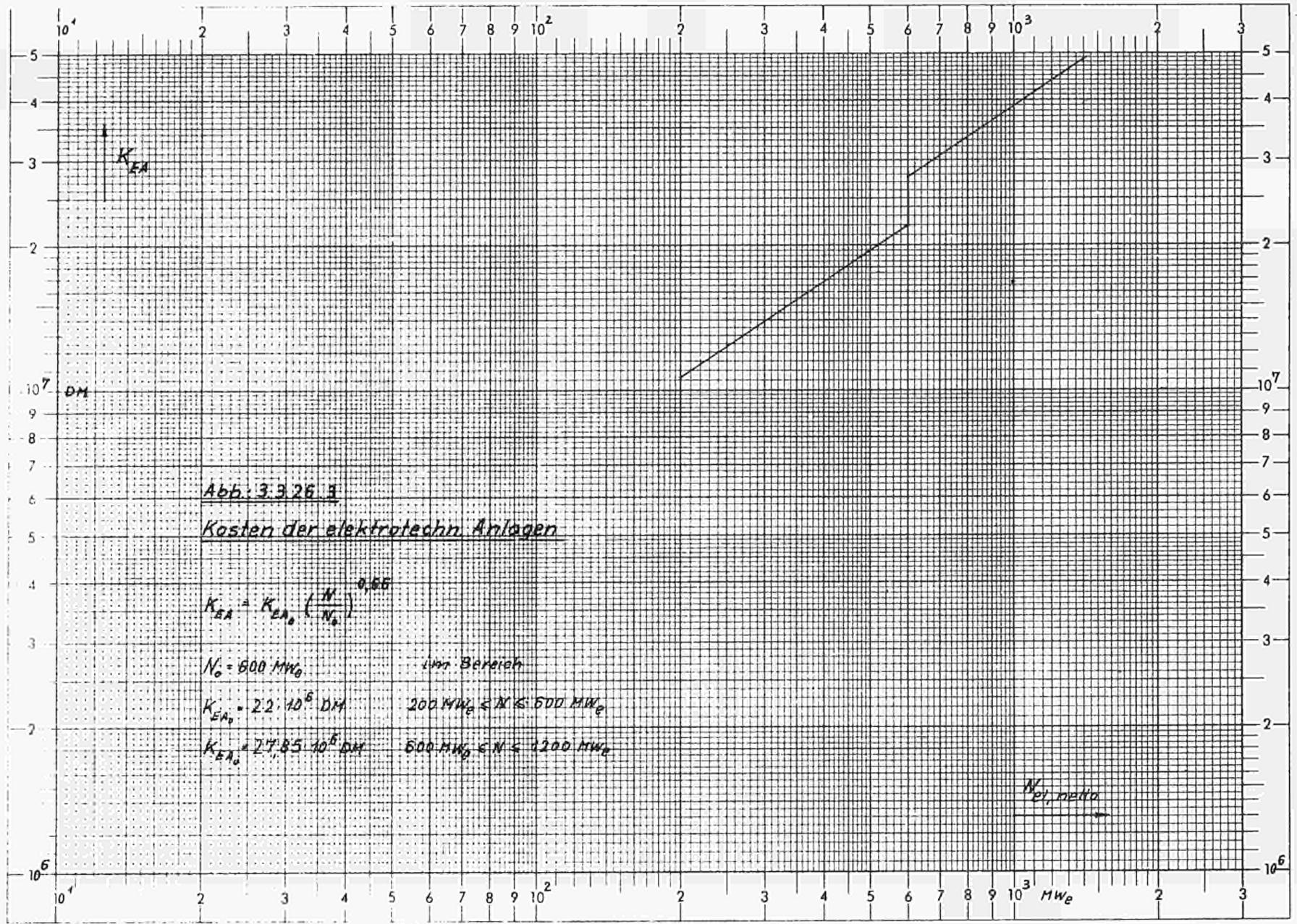
Abb. 3.3.26.1

Kosten der Maschinentransformatoren (220kV)
als Funktion der Scheinleistung

$$K_{TR} = 18 \text{ DM/kVA}$$







3.3.2.7 Die Kosten der Instrumentierung des konventionellen Kraftwerkteiles

Die Kosten der Instrumentierung des konventionellen Anlageteiles einer 250 MW_e - Anlage lassen sich aus einer Aufstellung der AEG*) zu

$$K_{I,K_{250}} \approx 2 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

schätzen.

Nach Angaben der AEG kostet die Instrumentierung einer 600 MW_e - Anlage etwa 1,3% der gesamten direkten Anlagekosten. Das ergibt mit den Bezugskosten von $276 \cdot 10^6$ DM für eine 600 MW_e - Anlage

$$K_{I,K_{600}} = 0,013 \cdot 276 \cdot 10^6 = 3,588 \cdot 10^6 \approx 3,6 \cdot 10^6 \text{ DM.}$$

Nimmt man an, daß beide Punkte im doppeltlogarithmischen Netz einer Geraden zugeordnet werden können, dann ergibt sich als Degressionsexponent

$$m = \frac{\lg \frac{3,6}{2}}{\lg \frac{600}{250}} = 0,671 \approx 0,67$$

Es kann weiter angenommen werden, daß, bedingt durch die doppelte Auslegung des konventionellen Teils für $N > 600$ MW_e, auch die Instrumentierung zweifach ausgeführt wird.

Im doppelt - logarithmischen Netz ergibt sich dann der in Abb. 3.3.27.1 dargestellte Kostenverlauf, der durch die Gleichungen

$$K_{I,K} = K_{I,K_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,67} \quad 3.3.27.1$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e \quad \text{im Bereich}$$

$$K_{I,K_0} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

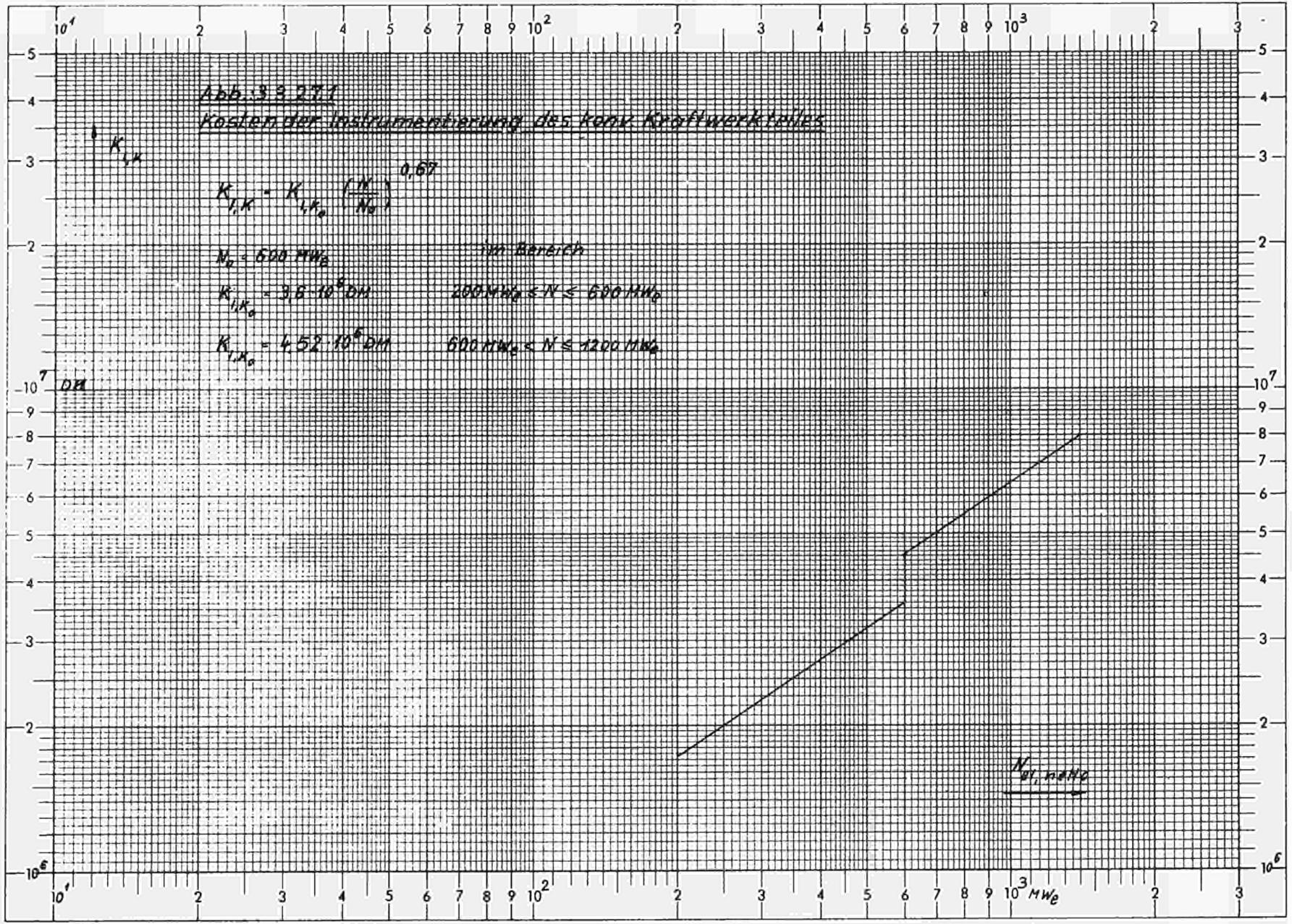
und

$$K_{I,K_0} = 4,52 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

wiedergegeben werden kann.

Im folgenden wird angenommen, daß dieser für Kraftwerke mit Siedewasser - Reaktoren ermittelte Kostenverlauf auch für solche mit Druckwasser - Reaktoren gültig ist.

*) lt. privater Mitteilung



3.3.3. Kostenanalyse ausgewählter Komponenten des Bauteils

Die Kosten des Bauteils beanspruchen bei der Größenordnung der in dieser Studie untersuchten Anlagen, verglichen mit den Kosten des nuklearen Dampferzeugungssystems und des konventionellen Kraftwerkteils mit ihren Hilfs- und Nebenanlagen, den kleinsten Teil der direkten Anlagekosten. Bei einer 600 MW_e - Anlage betragen sie ca. 18 ... 19% der gesamten direkten Anlagekosten, sie sind also etwa so hoch wie die Kosten der Turbo - Generator - Anlage. Ihre Abhängigkeit von der Kraftwerksnennleistung wird bei Anlagen dieser Größe nur noch gering sein. Direkt nachweisen läßt sich die Größe der Änderung des Bauvolumens - und damit der Baukosten - mit der Leistung mit einiger Sicherheit nur beim Maschinenhaus und beim Reaktorgebäude. Es ist also ein kleiner Degressionsexponent zu erwarten.

Eine detaillierte Kostenanalyse wäre besonders im Hinblick auf die Entdeckung von Verbilligungsmöglichkeiten nützlich; für den Zweck dieser Studie reicht eine globale Abschätzung des Kostenverlaufs jedoch aus, zumal die oftmals recht individuelle Bauweise eine Abgrenzung definierter Baukomponenten schwierig macht, und detaillierte Kostenangaben weitgehend fehlen.

Neben der globalen Abschätzung der gesamten Baukosten werden in den folgenden Abschnitten noch die Kosten der beiden größten Komponenten des Bauteils, soweit es die uns zugänglichen Informationen erlauben, untersucht.

3.3.3.1 Die Kosten des Maschinenhauses

Auf das Maschinenhaus entfällt etwa ein Viertel der gesamten Baukosten. Bei einer 600 MW_e-Anlage betragen die Kosten für das Gebäude ohne Maschinenfundamente ca. 2,9 % der direkten Anlagekosten des Kraftwerkes. Rechnet man die Maschinenfundamente mit zu den Kosten des Maschinenhauses, so wächst der Anteil auf etwa 4,3 %.

Zur Abschätzung der Kosten wird zunächst einmal der spez. Raumbedarf in Abhängigkeit von der Nennleistung des Kraftwerkes aus den Daten einiger gebauter, bzw. geplanter Kraftwerke ermittelt. In Tab. 3.3.31.1 sind die entsprechenden Daten aufgeführt und in Abb. 3.3.31.1 im doppelt-logarithmischen Netz dargestellt. Betrachtet man nur den Leistungsbereich $N > 200 \text{ MW}_e$, dann läßt sich der spez. Raumbedarf durch den in Abb. 3.3.31.1 eingezeichneten, gebrochenen Linienzug annähernd wiedergeben. An der Sprungstelle bei $N = 600 \text{ MW}_e$ wurde angenommen, daß beim Übergang auf zwei Turbosätze von 300 MW_e auch der spez. Raumbedarf gleich dem einer 300 MW_e-Anlage ist.

Der spez. Raumbedarf in Abhängigkeit von der Leistung läßt sich mit folgenden Gleichungen näherungsweise berechnen

$$r_M = r_{M_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,53} \quad 3.3.31.1$$

mit

$$\begin{aligned} N_0 &= 600 \text{ MW}_e && \text{im Bereich} \\ r_{M_0} &= 0,185 \frac{\text{m}^3}{\text{kW}_e} && 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e \\ r_{M_0} &= 0,267 \frac{\text{m}^3}{\text{kW}_e} && 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e \end{aligned}$$

Für den absoluten Raumbedarf gilt dann

$$R_M = R_{M_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,47} \quad 3.3.31.2$$

mit

$$\begin{aligned} N_0 &= 600 \text{ MW}_e && \text{im Bereich} \\ R_{M_0} &= 1,11 \cdot 10^5 \text{ m}^3 && 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e \end{aligned}$$

und

$$R_{M_0} = 1,6 \cdot 10^5 \text{ m}^3 \quad 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

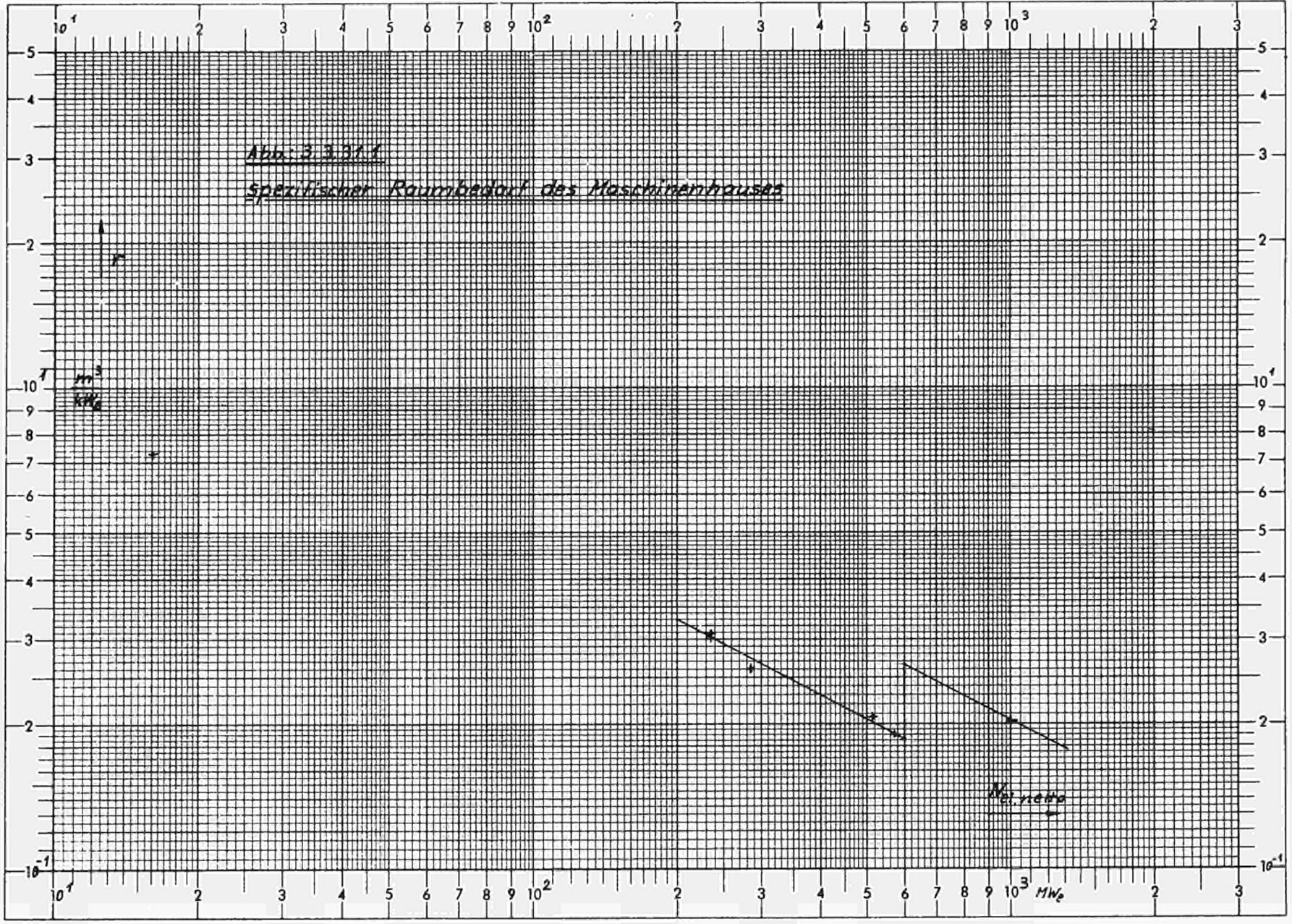
Darin bedeuten:

$$\begin{aligned} R_M &= \text{Raumbedarf für das Maschinenhaus in m}^3 \\ r_M &= \text{spez. Raumbedarf für das Maschinenhaus in} \\ &\quad \text{m}^3/\text{kW}_e \end{aligned}$$

Anlage	Elektrische Nettleistung [MWe]	Umgebauter Raum Maschinenhaus [m ³]	spez. Raumbedarf [m ³ /KW]
V A K	15	10900	0,73
K R B	237	73000	0,308
K W O	202,7	73000	0,258
S S W 513	513	103900	0,203
AEG 600	570	108100	0,19
GE 1000	1000	202000	0,202

Tab. 3.3.31.1

*) 2 Turbo - Generator - Sätze



N = Kraftwerksnettoleistung in MW_e

R_{M_0} , r_{M_0} , N_0 = entsprechende Daten einer Vergleichsanlage.

Diese Formeln zur Abschätzung des Raumbedarfs gelten nur näherungsweise, da die Gestaltung des Maschinenhauses und damit die Raumnutzung von Fall zu Fall verschieden ist. Außerdem wurden sie aus einer zu kleinen Zahl von Daten ermittelt, um mit ihnen repräsentative Durchschnittswerte berechnen zu können.

Zur Berechnung der Kosten müssen nun auch die Kosten je Kubikmeter „umbauter“ Raum festgelegt werden. Es ist anzunehmen, daß diese spezifischen Kosten nicht konstant sind, sondern sich mit dem Bauvolumen ändern, und zwar werden sie mit wachsendem Volumen abnehmen. In Tab. 3.3.31.2 ist eine Zusammenstellung bekannter bzw. geschätzter Maschinenhauskosten angegeben. Ersetzt man die stark voneinander abweichenden Angaben für die Anlage KRB (s.Tab. 3.3.31.2) durch ihren Mittelwert, dann läßt sich der Kostenverlauf im doppelt-logarithmischen Netz durch eine Gerade annähern (Abb. 3.3.31.2) und durch folgende Gleichung beschreiben

$$k_M = k_{M_0} \left(\frac{R_M}{R_{M_0}} \right)^{-0,089} \quad 3.3.31.3$$

mit

$$R_{M_0} = 1,11 \cdot 10^5 \text{ m}^3$$

$$k_{M_0} = 108 \frac{\text{DM}}{\text{m}^3}$$

Mit Hilfe von Gleichung 3.3.31.2 lassen sich die spez. Kosten der Gleichung 3.3.31.3 auch als Funktion der Kraftwerksnettoleistung ausdrücken

$$k_M = k_{M_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{-0,042} \quad 3.3.31.4$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e \quad \text{im Bereich}$$

$$k_{M_0} = 108 \frac{\text{DM}}{\text{m}^3} \quad 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

und

$$k_{M_0} = 104,5 \frac{\text{DM}}{\text{m}^3} \quad 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

Anlage	Umbauter Raum [m ³]	Preis [10 ⁶ DM]	Kosten für umbauten-Raum Maschinenhaus [DM/m ³]
V A K	10900	1,47	135
KRB* tatsächlicher Preis	73000	9,6	131,5
KRB* deutsche Nachkalkulation	73000	6,9	94,5
ABG 600**	108100	11,87	110

Tab. 3.3.31.2

* nach K.D. Fischer

** bei Annahme vom 460 DM/kWe für direkte Anlagekosten und 4,3 % für den Maschinenhausanteil

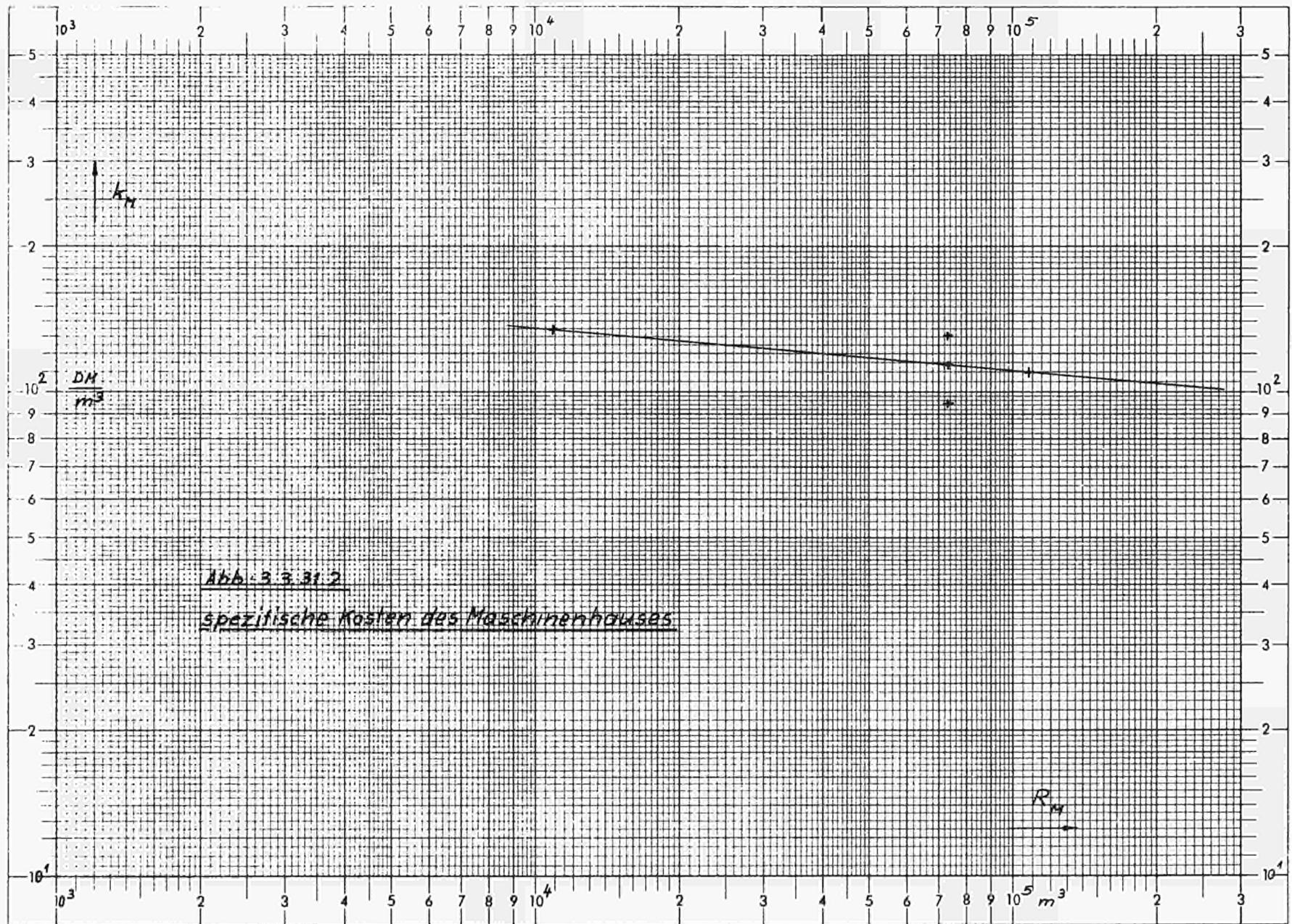


Abb. 3.3.31.2
spezifische Kosten des Maschinenhauses

Die absoluten Kosten ergeben sich aus Gleichung 3.3.31.4 und Gleichung 3.3.31.2 nach der Beziehung

$$\frac{K_M}{[\text{DM}]} = \frac{k_M}{[\text{DM}/\text{m}^3]} \cdot \frac{R_M}{[\text{m}^3]}$$

$$\begin{aligned} K_M &= k_{M_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{-0,042} \cdot R_{M_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{0,47} \\ &= k_{M_0} R_{M_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{0,428} = K_{M_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{0,428} \end{aligned}$$

$$K_M \approx K_{M_0} \left(\frac{N}{N_0}\right)^{0,43} \quad 3.3.31.5$$

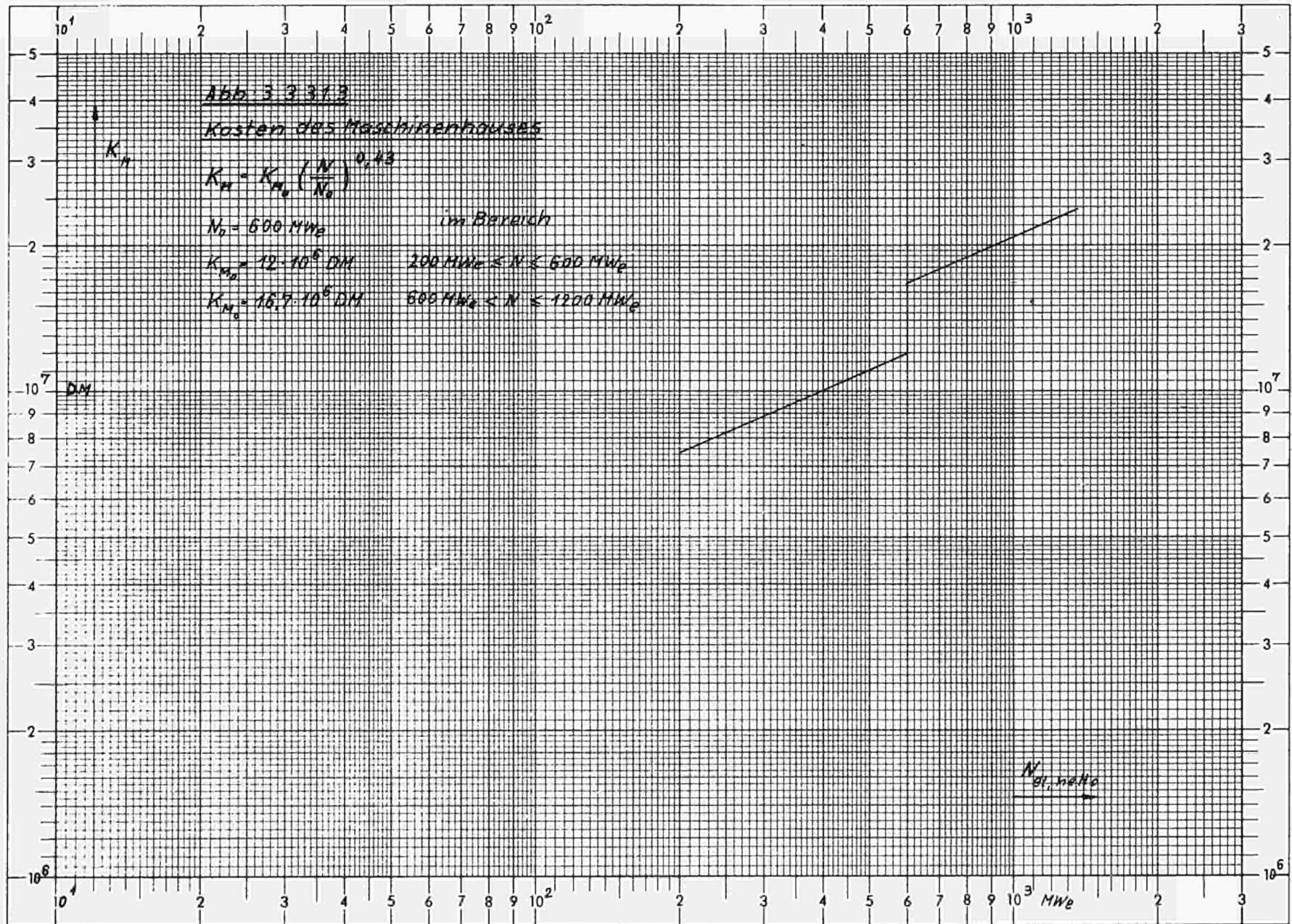
mit $N_0 = 600 \text{ MW}_e$ im Bereich

$$K_{M_0} = 12 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

und

$$K_{M_0} = 16,7 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

Aus Gleichung 3.3.31.5 ist zu entnehmen, daß sich mit den getroffenen Annahmen beim Übergang von einem 600 MW_e-Turbo-Generator-Satz auf zwei 300 MW_e - Sätze eine Kostenerhöhung von $4,7 \cdot 10^6$ DM für die Kosten des Maschinenhauses ergibt. Der Kostenverlauf ist in Abb. 3.3.31.3 dargestellt.



3.3.3.2 Die Kosten des Reaktorgebäudes

Die Abmessungen des Reaktorgebäudes werden im wesentlichen von der Größe des Reaktorumschließungsgehäuses, dem Raumbedarf für die Brennstoffhandhabung und den Abmessungen des Brennelementlagerbeckens bestimmt. Der Raumbedarf für die Brennstoffhandhabung kann als unabhängig von der Kraftwerksleistung angesehen werden, da er hauptsächlich von der Länge der Brennelemente bestimmt wird.

Die Abmessungen des Reaktorumschließungsgehäuses von Siedewasser - Reaktoren in Abhängigkeit von der Leistung sind im Abschnitt 3.3.1.10.23 untersucht worden.

Für das von SSW bei Druckwasser - Reaktoren verwendete Druckabbausystem kann ein in Größe und Verlauf ähnlicher Raumbedarf angenommen werden, da der Vorteil des kleineren Druckgefäßes durch den Platzbedarf der mitzuumschließenden Wärmetauscher bei weitem aufgehoben wird.

Der Raumbedarf des Brennelementlagerbeckens und der sonstigen im Reaktorgebäude unterzubringenden Einrichtungen, wie Primärreinigung, Komponentenkühlsysteme usw., ist nur im geringen Maße von der Kraftwerksleistung abhängig, so daß der prozentuale Anteil des Reaktorumschließungsgehäuses am gesamten umbauten Raum des Reaktorgebäudes mit wachsender Kraftwerks - Nennleistung zunehmen wird.

Bei einer 600 MW_e - Siedewasserreaktor - Anlage beträgt der Anteil des Druckabbausystems am umbauten Raum des Reaktorgebäudes etwa 19%. Für die Abhängigkeit dieses Anteils von der Kraftwerks - Nennleistung soll näherungsweise gelten:

$$p = p_0 \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,22} \quad 3.3.32.1$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$p_0 = 0,19$$

Aus der Gleichung 3.3.1.1023.9, der ein konstanter Kubikmeterpreis $k_{D,A}$ zugrunde liegt, ergibt sich mit

$$V_{DA} = \frac{K_{DA}}{k_{DA}}$$

$$V_{DA} = \frac{K_{DA}}{k_{DA}} \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,62} \quad 3.3.32.2$$

Aus

$$V_{DA} = p \cdot V_{RG}$$

mit

V_{DA} = umbauter Raum des Druckabbausystems

V_{RG} = umbauter Raum des Reaktorgebäudes

p = Anteil von $V_{D,A}$ an $V_{B,R}$

ergibt sich

$$V_{RG} = \frac{V_{DA}}{p} = \frac{1}{p} \cdot \frac{K_{DA}}{k_{DA}} \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,62} \quad 3.3.32.3$$

Gleichung 3.3.32.1 in Gleichung 3.3.32.3 eingesetzt liefert

$$V_{RG} = \frac{1}{p_0} \cdot \frac{K_{DA}}{k_{DA}} \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,4} \quad 3.3.32.3a$$

Berücksichtigt man, daß

$$\frac{1}{p_0} \cdot \frac{K_{DA}}{k_{DA}} = V_{RG_0}$$

der umbaute Raum des Reaktorgebäudes einer 600 MW_e - Anlage ist, dann kann die Gleichung 3.3.32.3a wie folgt geschrieben werden

$$V_{RG} = V_{RG_0} \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,4} \quad 3.3.32.4$$

Für die weiteren Betrachtungen soll im Bereich

$$200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

ein konstanter Kubikmeterpreis k_{RG} für das Reaktorgebäude vorausgesetzt werden.

Für den Kostenverlauf ergibt sich dann mit

$$K_{RG} = k_{RG} \cdot V_{RG}$$

aus Gleichung 3.3.32.4

$$K_{RG} = K_{RG_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,4} \quad 3.3.32.5$$

mit

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{RG_0} = 13,8 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

im Bereich

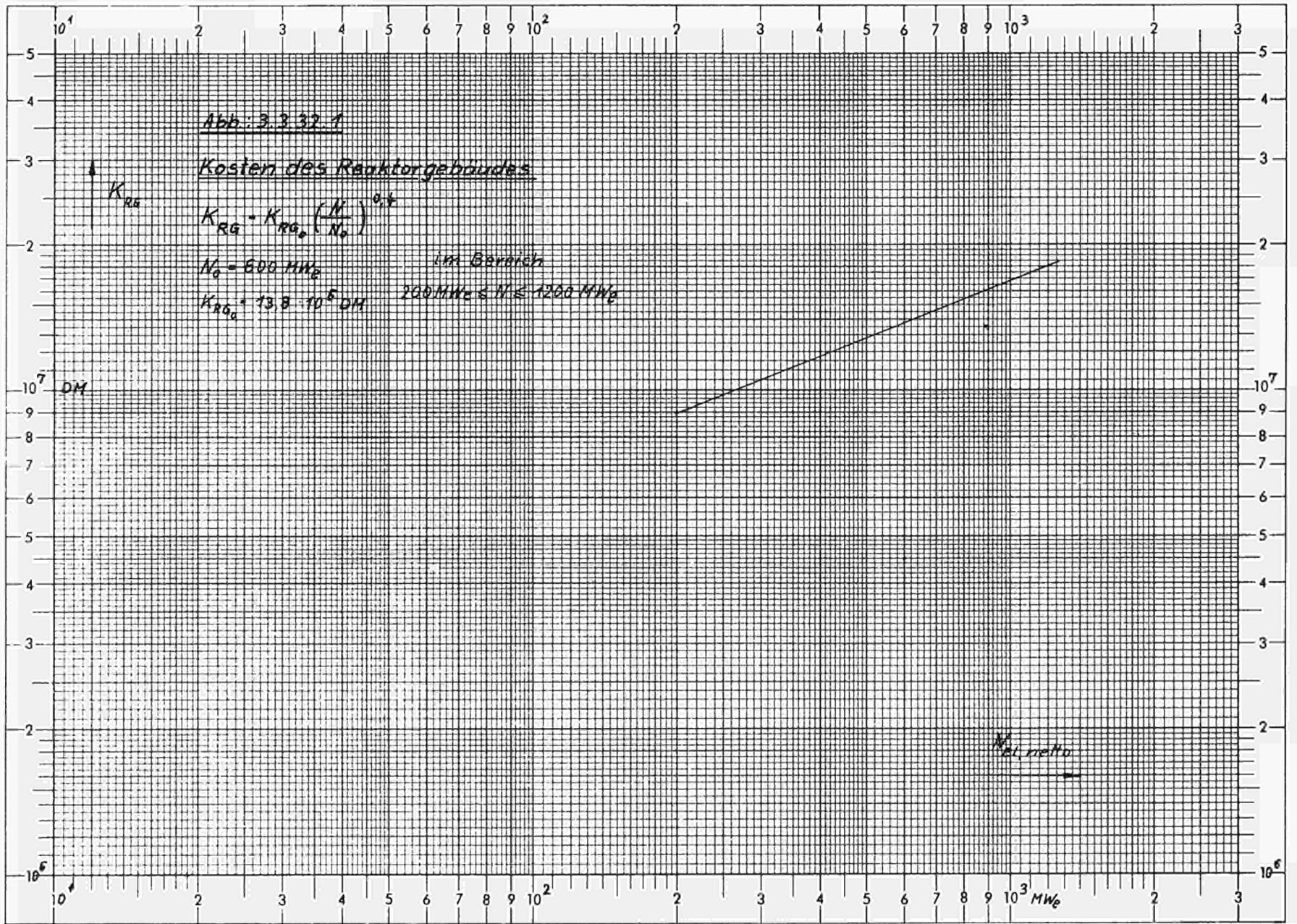
$$200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e .$$

Die Vergleichskosten wurden aus einer Angabe, nach der die Kosten des Reaktorgebäudes einer 600 MW_e - Anlage etwa 5% der direkten Anlagekosten betragen, auf

$$K_{RG_0} = 0,05 \cdot 276 \cdot 10^6 = 13,8 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

geschätzt.

Für die Kosten der Reaktorgebäude von Druckwasser - Reaktoren wird zur Verwendung in dieser Studie angenommen, daß sie sich in Größe und Kostenverlauf nicht wesentlich von den durch Gleichung 3.3.32.5 gegebenen Kosten unterscheiden.



3.3.3.3 Die Kosten der restlichen Gebäude

Unter den Rest der Gebäude sind die Hilfsanlagegebäude, das Verwaltungsgebäude, die Werkstatt-, Betriebs- und sonstigen Gebäude sowie alle Außenanlagen zu rechnen.

Die Kosten dieses gesamten Restteils können für Anlagen dieser Größenordnung als nahezu unabhängig von der Nennleistung des Kraftwerkes angesehen werden. Der Degressionsexponent wird aus diesem Grund auf

$$m = 0,1$$

geschätzt.

In Abschnitt 3.3.3.4 sind die geschätzten Kosten des gesamten Bauteils einer 600 MW_e - Anlage mit $50 \cdot 10^6$ DM angegeben. Für den Restteil bleiben nach Abzug der Kosten des Maschinenhauses und des Reaktorgebäudes $24,2 \cdot 10^6$ DM übrig.

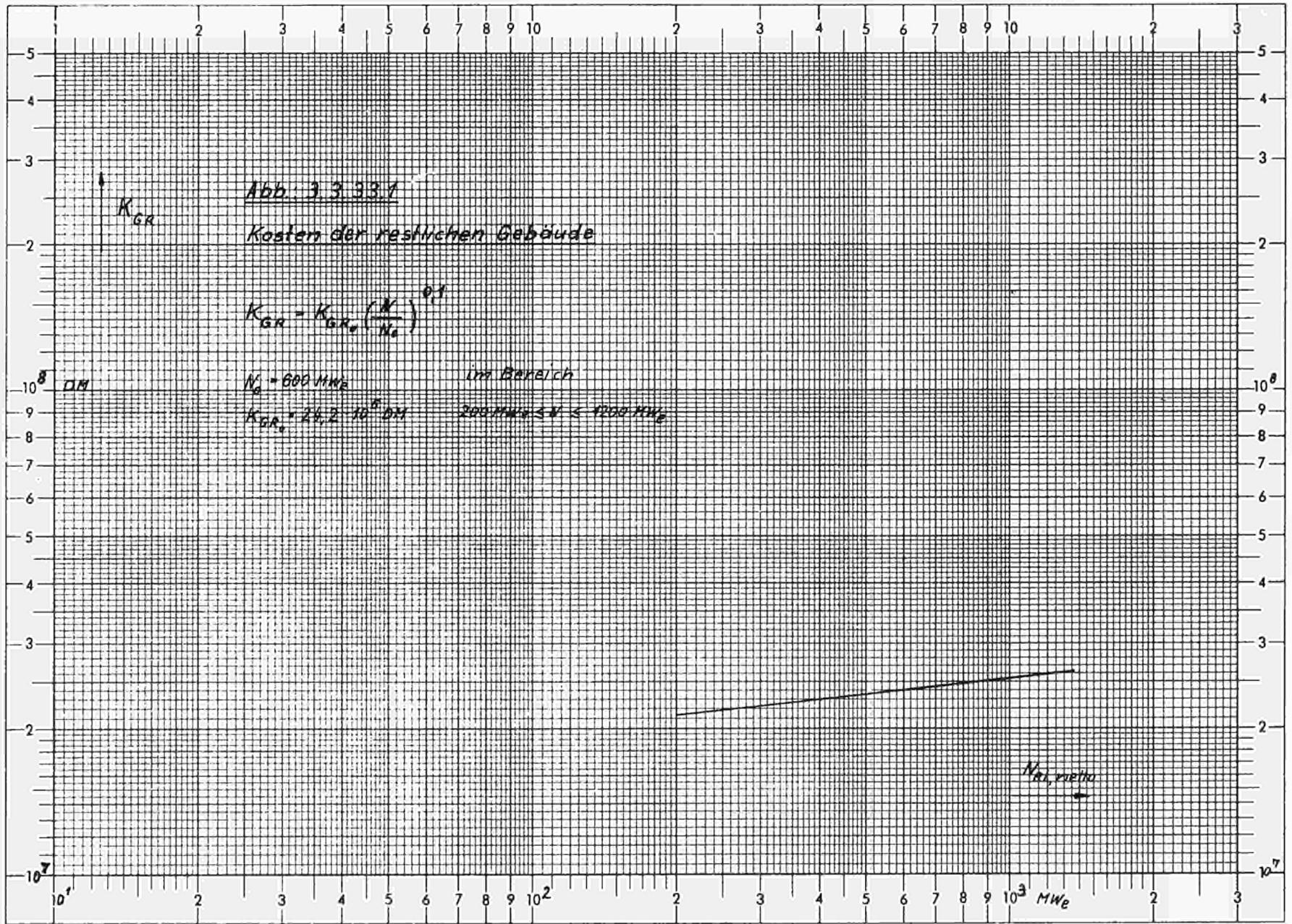
Mit dem geschätzten Exponenten ergibt sich dann folgender Kostenverlauf

$$K_{GR} = K_{GR_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,1} \quad 3.3.33.1$$

mit

$$\begin{aligned} N_0 &= 600 \text{ MW}_e \\ K_{GR_0} &= 24,2 \cdot 10^6 \text{ DM} \end{aligned}$$

im Bereich
 $200 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$



3.3.3.4 Globalabschätzung der Kosten des Bauteils

Nach Angaben des RWE betragen die Kosten des gesamten Bauteils einer 250 MW_e - Anlage etwa $40 \cdot 10^6$ DM. Die Kosten einer 600 MW_e - Anlage werden von anderen Firmen mit ca. 18...20% der gesamten direkten Anlagekosten angegeben. Das ergibt unter Verwendung der Vergleichskosten von $276 \cdot 10^6$ DM für eine 600 MW_e - Anlage

$$K_B = (0,18 \dots 0,2) 276 \cdot 10^6 = (49,68 \dots 55,2) \cdot 10^6 \text{ DM ,}$$

also schätzungsweise

$$K_B \approx 50 \cdot 10^6 \text{ DM .}$$

Unter der Voraussetzung eines linearen Kostenverlaufs zwischen diesen beiden Punkten im doppelt - logarithmischen Netz (Abb. 3.3.34.1) ergibt sich ein Degressionsexponent von

$$m = \frac{\lg \frac{50}{40}}{\lg \frac{600}{250}} = \frac{\lg 1,25}{\lg 2,4} = 0,2549 \approx 0,25 .$$

Damit erhält man für den Kostenverlauf des gesamten Bauteils die Gleichung

$$K_B = K_{B_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{0,25} \quad 3.3.34.1$$

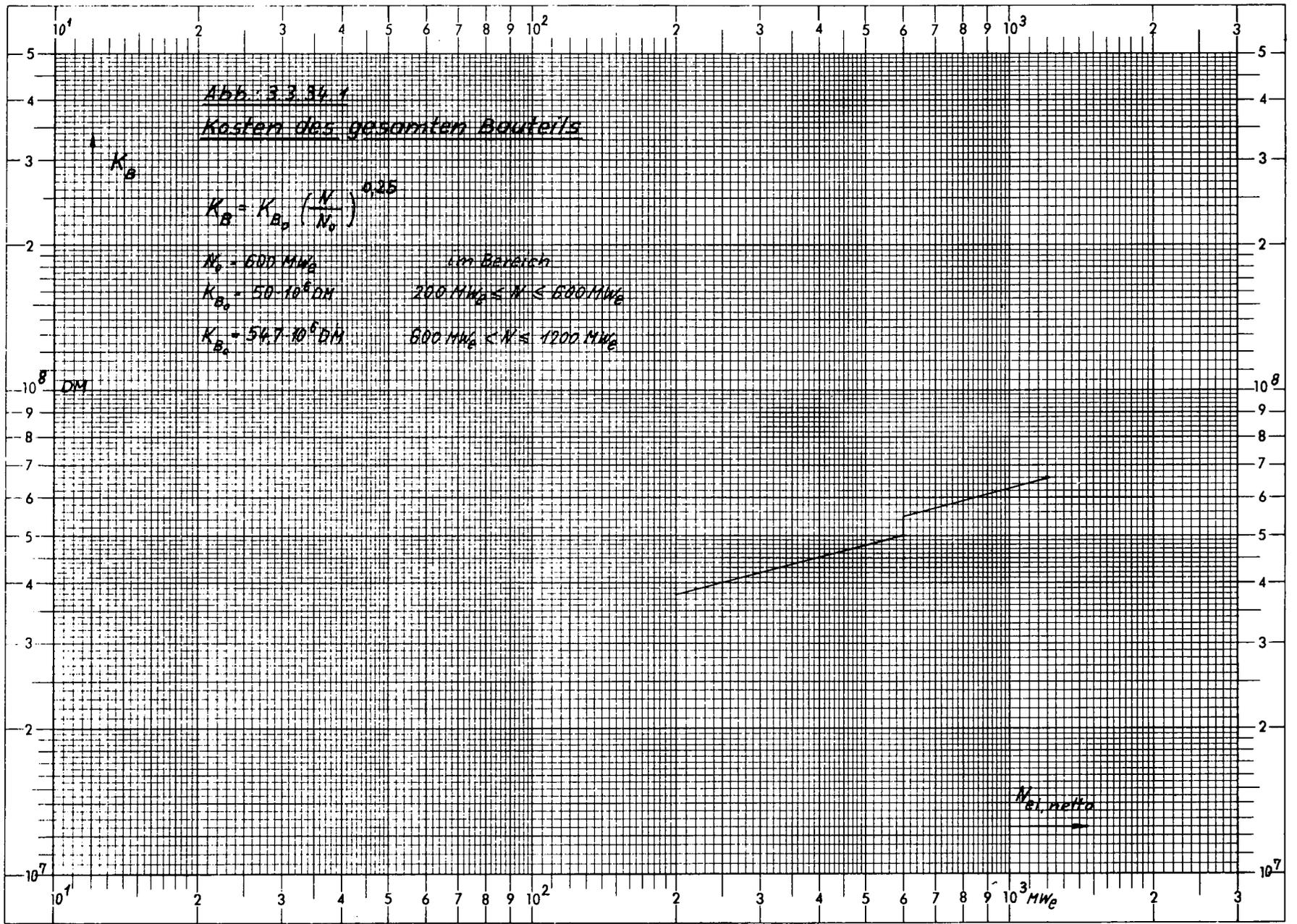
mit

$$K_{B_0} = 50 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad \text{im Bereich}$$

$$N_0 = 600 \text{ MW}_e \quad 200 \text{ MW}_e \leq N \leq 600 \text{ MW}_e$$

$$K_{B_0} = 54,7 \cdot 10^6 \text{ DM} \quad 600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$$

Der Kostensprung von $4,7 \cdot 10^6$ DM bei 600 MW_e ergibt sich durch den Sprung in den Maschinenhauskosten (siehe Gleichung 3.3.31.5).



3.4 Zusammenstellung der direkten Anlagekosten

In den folgenden Abschnitten werden die im Kapitel 3.3 ermittelten Kosten der einzelnen Anlagekomponenten von Kraftwerken mit Siede- bzw. Druckwasser - Reaktoren für Nettoleistungen von 250; 300; 500; 600; 1000 und 1200 MW_e zu den direkten Anlagekosten zusammengestellt.

Für die den Kostenrechnungen zugrunde liegenden technischen Daten wurden heute übliche Werte gewählt. Die bei der Kostenermittlung verwendeten Gleichungen sind in den Tabellen angegeben.

Im Abschnitt 3.4.1 werden zunächst die Kosten der Komponenten berechnet, die umfangreiche Nebenrechnungen erfordern.

Im Abschnitt 3.4.2 sind die Kosten der einzelnen Komponenten mit Angabe des Berechnungsverfahrens zu den gesamten direkten Anlagekosten von Kraftwerken mit Siedewasser - Reaktoren und im Abschnitt 3.4.3 für solche mit Druckwasser - Reaktoren zusammengestellt.

3.4.1 Berechnung der Kosten einzelner Anlagekomponenten

Die Tabellen 3.41.1 und 2 enthalten die Berechnung der Kosten der Reaktor-druckgefäÙe von Siedewasser - und Druckwasser - Reaktoren für die oben angegebenen Nettoleistungen.

Bei den Siedewasser - Reaktor - Anlagen wurden einheitlich für alle Leistungen folgende Werte zugrunde gelegt:

$$\begin{aligned} \text{spezifische Leistung } n &= 36 \text{ MW}_{\text{th}} / \text{m}^3 \\ \text{aktive Kernhöhe } h &= 3,70 \text{ m} \\ \text{Nettowirkungsgrad } \eta &= 0,32 \end{aligned}$$

Die spezifische Leistung von Druckwasser - Reaktoren wurde für $N \leq 300 \text{ MW}_e$ mit

$$n = 71 \text{ MW}_{\text{th}} / \text{m}^3$$

und für $N > 300 \text{ MW}_e$ mit

$$n = 74 \text{ MW}_{\text{th}} / \text{m}^3$$

angenommen.

Zur Erreichung eines besseren Höhe - zu - Durchmesser - Verhältnisses des ReaktordruckgefäÙes wurde die aktive Kernhöhe mit steigender Leistung wie folgt vergrößert

$$\begin{aligned} N = 250 \dots 300 \text{ MW}_e & \quad h = 2,60 \text{ m} \\ N = 500 \dots 600 \text{ MW}_e & \quad h = 3,10 \text{ m} \\ N = 1000 \dots 1200 \text{ MW}_e & \quad h = 3,60 \text{ m} \end{aligned}$$

Der Nettowirkungsgrad wurde für alle Leistungen einheitlich auf

$$\eta = 0,32$$

geschätzt.

Zur Berechnung der DruckgefäÙwandstärke wurde für beide Reaktortypen anstelle des überholten Materialkennwertes

$$K = \frac{\sigma_B}{4} = 14,13 \text{ kp/mm}^2$$

der nach dem neuen „ASME pressure vessel code III“ zulässige Wert

$$K = \frac{\sigma_B}{3} = 18,8 \text{ kp/mm}^2$$

verwendet. Dabei wurde die gleiche Werkstoffqualität wie die des beim KRB - Druckgefäß verwendeten Werkstoffs (siehe Abschnitt 3.3.1.1.4) vorausgesetzt.

In Tabelle 3.41.5 und 6 erfolgt die Abschätzung der Zahl der Umwälzkreise und die Berechnung der Kosten der Umwälzkreise.

Für Siedewasser - Reaktoren wurde das Durchsatzgewicht je Kreislauf entsprechend den Angaben der AEG auf

$$G_K = 6 \cdot 10^6 \text{ kg/h}$$

festgesetzt.

Einheitlich für alle Leistungen wurde das Dampf - Wasser - Gewichtsverhältnis zu

$$\frac{G_D}{G} = 0,1$$

und die Unterkühlungsenthalpiedifferenz zu

$$\Delta i = 15,6 \text{ kcal/kg}$$

angenommen.

Der Berechnung der Zahl der Umwälzkreise von Druckwasser - Reaktoren ist ein Durchsatzgewicht von

$$G_K = 13,5 \cdot 10^6 \text{ kg/h}$$

je Kreislauf zugrunde gelegt worden.

Die Enthalpiedifferenz wurde zunächst einheitlich auf

$$\Delta i = 35,9 \text{ kcal/kg}$$

festgelegt. Da aber unter dieser Bedingung bei einem 600 MW_e - Kraftwerk gerade der Übergang von 3 auf 4 Umwälzkreise notwendig wird, ist die 600 MW_e - Anlage zusätzlich mit einer Enthalpiedifferenz von

$$\Delta i = 40 \text{ kcal/kg}$$

durchgerechnet worden (siehe Tabelle 3.41.6).

Die Tabellen 3.41.3 und 4 enthalten die Berechnung der Kosten der Steuerstabeinrichtung; die Tabellen 3.41.7 und 8 die Kostenberechnung der elektrotechnischen Ausrüstung des nuklearen Dampferzeugungssystems.

Berechnung der Kosten des Reaktordruckgefäßes

Tab.: 3.41.1		Reaktortyp: Siedewasser-Reaktor							
Bezeichnung	Zeichen	Dimens.	Gleichung Nr.						
Leistung	N	MW _{e,netto}	-	250	300	500	600	1000	1200
spez. Leistung	n	MW _{th} /m ³	-	36	36	36	36	36	36
aktive Kernhöhe	h	m	-	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70
Wirkungsgrad	η	-	-	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Einflußgröße	L	m ²	3.3.111.2b	5,865	7,038	11,730	14,077	23,461	28,153
Kerndurchmesser	d	m	3.3.111.2a	2,86	3,13	4,04	4,43	5,72	6,26
Innendurchmesser	D _i	m	3.3.111.12	3,83	4,10	5,01	5,40	6,69	7,23
Höhe	H	m	3.3.112.8	16,03	16,53	18,02	18,62	20,32	21,00
Betriebsdruck	p	kp/cm ²	-	72	72	72	72	72	72
Materialkennwert K= B/3	K	kp/mm ²	-	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
S/D _i		-	3.3.114.7	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254	0,0254
Einflußgröße	L ₁	m ³	3.3.115.14	5,97	7,06	11,49	13,79	23,10	27,88
Gewicht	G	t	3.3.116.2	252	286	412	472	695	801
Kosten x 10 ⁶	K _D	DM	3.3.115.18	4,85	5,74	9,34	11,21	18,78	22,67
Montage + Transport x 10 ⁶	K _{M,T}	DM	3.3.117.1	1,81	1,98	2,56	2,8	3,61	3,96
Gesamtkosten x 10 ⁶	K _{D,G}	DM	-	6,66	7,72	11,90	14,01	22,39	26,63

Berechnung der Kosten des Reaktordruckgefäßes

Tab.: 3.41.2		Reaktortyp: Druckwasser-Reaktor							
Bezeichnung	Zeichen	Dimens.	Gleichung Nr.						
Leistung	N	MW _{e,netto}	-	250	300	500	600	1000	1200
spez. Leistung	n	MW _{th} /m ³	-	71	71	74	74	74	74
aktive Kernhöhe	h	m	-	2,60	2,60	3,10	3,10	3,60	3,60
Wirkungsgrad	η	-	-	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Einflußgröße	L	m ²	3.3.111.2b	4,232	5,078	6,811	8,173	11,73	14,076
Kerndurchmesser	d	m	3.3.111.2a	2,35	2,57	2,98	3,26	3,90	4,28
Innendurchmesser	D _i	m	3.3.111.12	3,07	3,30	3,71	3,99	4,63	5,01
Höhe	H	m	3.3.113.1	8,80	9,02	10,53	10,81	12,55	12,93
Betriebsdruck	p	kp/cm ²	-	145	145	145	145	145	145
Materialkennwert K= B/3	K	kp/mm ²	-	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
S/D _i		-	3.3.114.7	0,0549	0,0549	0,0549	0,0549	0,0459	0,0549
Einflußgröße	L ₁	m ³	3.3.115.4	4,55	5,39	7,96	9,45	14,77	17,82
Gewicht	G	t	3.3.116.2	206	234	313	356	497	572
Kosten x 10 ⁶	K _D	DM	3.3.115.16 ₁₉	3,96	4,69	6,92	9,83	15,36	18,53
Montage + Transport x 10 ⁶	K _{M,T}	DM	3.3.117.1	1,59	1,74	2,25	2,46	3,15	3,48
Gesamtkosten x 10 ⁶	K _{D,G}	DM	-	5,55	6,43	9,17	12,29	18,51	22,01

30 $\cdot 10^6$ DM

Abb. 3.41.1

Kosten des Reaktor Druckgefäßes (ohne Einbauten)

K_G

20

10

0

100

200

300

400

500

600

700

800

900

1000 MW_e

1100

1200

Netto

Siedewasser-Reaktor

Druckwasser-Reaktor

Berechnung der Kosten der Steuerstabeinrichtung

Tab.: 3.41.3		Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor							
Bezeichnung	Zeichen	Dimension	Gleichung Nr.						
Leistung	N	MW _{e, netto}	-	250	300	500	600	1000	1200
Steuerstabteilung	t _{St}	m	-	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
Faktor	C ₃	-	3.3.131.3	0,9699	0,9713	0,9795	0,9833	0,9987	1,0000
Steuerstabzahl	Z _{St}	-	3.3.131.3	61	73	124	149	252	303
Kosten x 10 ⁶	K _{St}	DM	3.3.133.6	8,02	9,27	14,14	16,39	25,44	29,85
Tab.: 3.41.4		Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor							
Brennstabteilung	t _{BS}	cm	-	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
Einflußgröße	L	m ²	3.3.111.2b	4,232	5,078	6,811	8,173	11,73	14,076
Steuerstabzahl	Z _{St}	-	3.3.132.5	24	28	35	40	53	62
aktive Kernhöhe	h	m		2,60	2,60	3,10	3,10	3,60	3,60
Kosten x 10 ⁶	K _{St}	DM	3.3.133.8	2,72	3,03	4,01	4,40	5,95	6,64

Berechnung der Anlagekosten der Umwälzkreise

Tab.: 3.41.5		Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor							
Bezeichnung	Zeichen	Dimension	Gleichung Nr.						
Leistung	N	MW _e , netto	-	250	300	500	600	1000	1200
Dampf-Wasser-Verhältnis	G _D /G	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Verdampfungswärme	r	kcal/kg	-	360	360	360	360	360	360
Wirkungsgrad	η	-	-	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
Enthalpiedifferenz	Δi	kcal/kg	-	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
Einflußgröße	L ₂	$\frac{MW}{kcal} \cdot \frac{kg}{kg}$	3.3.14.6	15,14	18,17	30,28	36,34	60,56	72,67
Durchsatzgewicht x 10 ⁶	G	kg/h	3.3.14.5	13,02	15,62	26,04	31,24	52,08	62,50
Durchsatz / Kreislauf x 10 ⁶	G _K	kg/h	-	6	6	6	6	6	6
Zahl der Kreisläufe	Z _K	-	3.3.141.2	2,17	2,60	4,34	5,21	8,68	10,42
Zahl der Kreisläufe (gewählt)	Z _K	-	-	2	3	4	5	9	10
Kosten der Pumpen x 10 ⁶	K _P	DM	3.3.142.1a	2,5	3,75	5,00	6,25	11,25	12,50
Rohrl. + Armaturen 60% x 10 ⁶		DM		1,50	2,25	3,00	3,75	6,75	7,50
Zwischensumme x 10 ⁶		DM		4,00	6,00	8,00	10,00	18,00	20,00
Transport + Montage 20% x 10 ⁶		DM		0,80	1,20	1,60	2,00	3,60	4,00
Gesamtkosten x 10 ⁶	K _u	DM		4,80	7,20	9,60	12,00	21,60	24,00

Berechnung der Anlagekosten der Umwälzkreise

Tab.: 3.41.6		Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor									
Bezeichnung	Zeichen	Dimension	Gleichung Nr.								
Leistung	N	MW _{e,netto}	-	250	300	500	600	600	1000	1200	
Aufwärmspanne	$\Delta \vartheta$	°C	-	27	27	27	30	27	27	27	
spez. Wärme	c _p	kcal/kg°C	-	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	
Wirkungsgrad	η		-	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	
Enthalpiedifferenz	Δi	kcal/kg	-	35,9	35,9	35,9	40	35,9	35,9	35,9	
Einflußgröße	L ₂	MW _e kg/kcal	3.3.14.7	21,76	26,11	43,52	46,88	52,23	87,03	104,44	
Durchsatzgewicht x 10 ⁶	G	kg/h	3.3.14.5	18,71	22,45	37,42	40,31	44,92	74,85	89,82	
Durchsatz/Kreislauf x 10 ⁶	G _K	kg/h	-	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	
Zahl der Kreisläufe	Z _K	-	3.3.141.2	1,39	1,66	2,77	2,99	3,33	5,54	6,65	
Zahl der Kreisläufe (gewählt)	Z _K	-	-	2	2	3	3	4	6	7	
Kosten der Pumpen x 10 ⁶	K _p	DM	3.3.142.1a	5,0	5,0	7,5	7,5	10,0	15,0	17,5	
Rohrl. + Armaturen 60% x 10 ⁶	K _{R,A}	DM	-	3,0	3,0	4,5	4,5	6,0	9,0	10,5	
Zwischensumme x 10 ⁶		DM	-	8,0	8,0	12,0	12,0	16,0	24,0	28,0	
Kosten der Wärmetauscher x 10 ⁶	K _w	DM	3.3.151.9	8,0	8,0	12,0	12,0	16,0	24,0	28,0	
Zwischensumme x 10 ⁶		DM	-	16,0	16,0	24,0	24,0	32,0	48,0	56,0	
Transport + Montage 10% x 10 ⁶	K _{T,M}	DM	-	1,6	1,6	2,4	2,4	3,2	4,8	5,6	
Gesamtkosten x 10 ⁶	K _u	DM	-	17,6	17,6	26,4	26,4	35,2	52,8	61,6	

Die Kosten der elektrotechnischen Ausrüstung des nuklearen Dampferzeugungssystems

Tab.: 3.41.7		Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor									
Bezeichnung	Zeichen	Dimension									
Leistung	N	MW _e			250	300	500	600	1000	1200	
Zahl der Kreisläufe	Z _K	-	Tab.		2	3	4	5	9	10	
Kosten je Kreislauf x 10 ⁶	K _{EN,K}	DM	Gl.	3.3.17.1	2	2	2	2	2	2	
Kosten x 10 ⁶	K _{EN}	DM			4	6	8	10	18	20	
Transport + Montage 15% x 10 ⁶		DM			0,6	0,9	1,2	1,5	2,7	3,0	
Gesamtkosten x 10 ⁶	K _{EN,G}	DM			4,6	6,9	9,2	11,5	20,7	23,0	
Tab.: 3.41.8		Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor									
Leistung	N	MW _e			250	300	500	600	600	1000	1200
Zahl der Kreisläufe	Z _K	-	Tab.		2	2	3	3	4	6	7
Kosten je Kreislauf x 10 ⁶	K _{EN,K}	DM	Gl.	3.3.17.2	6	6	6	6	6	6	6
Kosten x 10 ⁶	K _{EN}	DM			12	12	18	18	24	36	42
Transport + Montage 10% x 10 ⁶		DM			1,2	1,2	1,8	1,8	2,4	3,6	4,2
Gesamtkosten x 10 ⁶	K _{EN,G}	DM			13,2	13,2	19,8	19,8	26,4	39,6	46,2

3.4.2 Zusammenstellung der direkten Anlagekosten von Kraftwerken mit Siedewasser - Reaktoren

In den Tabellen 3.42.1 bis 3 sind die gesamten „direkten Anlagekosten“ von Kraftwerken mit Siedewasser - Reaktoren zusammengestellt worden. Die in Tabelle 3.42.3 aufgeführten kalkulatorischen Zuschläge von 3...5% berücksichtigen die Kosten für Versicherungen, Baustelleneinrichtungen usw.. Sie sind nach der Größe der Anlage gestaffelt, wobei angenommen wurde, daß der Prozentsatz mit zunehmender Anlagengröße abnimmt. Nach Herst.- Angaben betragen diese Kosten bis zu 6% der direkten Anlagekosten.

Die Höhe der Kosten und die Tendenz des Kostenverlaufes stimmt mit den Werten der Globalabschätzung in Abschnitt 3.2.1 sehr gut überein. Die aus der genaueren Analyse bestimmten Kosten liegen etwas über den dort ermittelten Werten.

An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß die hier ermittelten „direkten Anlagekosten“ nicht mit den „gesamten Anlagekosten“ identisch sind, die zusätzlich noch die „indirekten Anlagekosten“ enthalten (siehe Abschnitt 2.2.1).

Die indirekten Anlagekosten von Siedewasser - Reaktor - Anlagen unterscheiden sich, wie aus Abschnitt 3.4.3 hervorgeht, in ihrer Höhe nicht wesentlich von den indirekten Anlagekosten der Druckwasser - Reaktor - Anlagen.

Zusammenstellung der direkten Anlagekosten

Tab.: 3.42.1	Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor							
	nukleares Dampferzeugungssystem, Hilfs- und Nebenanlagen							
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage		Kostenangaben in 10 ⁶ DM					
Leistung in MW _e , netto			250	300	500	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.5	2	3	4	5	9	10
Reaktordruckgefäß	Tabelle	3.41.1	6,66	7,72	11,90	14,01	22,39	26,63
Einbauten	Gleichung	3.3.12.6	3,65	4,15	5,92	6,73	9,82	11,34
Steuerstabeinrichtung	Tabelle	3.41.3	8,02	9,27	14,14	16,39	25,44	29,85
Umwälzkreis	Tabelle	3.41.5	4,80	7,20	9,60	12,00	21,60	24,00
elektrotechn. Ausrüstung	Tabelle	3.41.7	4,60	6,90	9,20	11,50	20,70	23,00
Instrumentierung	Gleichung	3.3.181.2	5,98	6,52	8,34	9,10	11,73	13,00
Hilfssysteme	Gleichung	3.3.1.101.2	11,44	12,75	17,32	19,32	26,89	30,54
nukl. Dampferzeugungssystem			45,15	54,51	76,42	89,05	138,57	158,36
Druckabbausystem	Gleichung	3.3.1.1023.9	3,78	4,23	5,81	6,50	8,92	9,99
Restteil	Gleichung	3.3.1.1024.2	3,27	3,64	4,95	5,52	7,50	8,58
nukleare Nebenanlagen			7,05	7,87	10,76	12,02	16,42	18,57

Zusammenstellung der direkten Anlagekosten (Fortsetzung)

Tab.: 3.42.2	Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor							
	konventioneller Kraftwerksteil, Bauteil							
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage		Kostenangaben in 10 ⁶ DM					
Leistung in MW _e , netto			250	300	500	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.5	2	3	4	5	9	10
Turbo - Generator - Satz	Gleichung	3.3.21.5	27,98	31,22	42,40	47,30	84,80	94,60
Rohrl., Armaturen, Vorwärmer	"	3.3.22.1	10,93	12,75	19,70	23,00	39,37	45,93
Kondensatreinigung	"	3.3.23.1	1,51	1,74	2,63	3,04	5,25	6,08
Kühlwasseranlagen	"	3.3.24.3	1,53	1,74	2,44	2,76	3,94	4,50
elektrotechn. Anlagen	"	3.3.26.2	12,35	13,92	19,51	22,00	38,99	44,00
Instrumentierung	"	3.3.27.1	2,00	2,26	3,19	3,60	6,36	7,19
Nebenanlagen	"	3.3.25.2	6,51	7,26	9,86	11,00	15,17	17,15
konventioneller Kraftwerksteil			62,81	70,89	99,73	112,70	193,88	219,45
Maschinenhaus	"	3.3.31.5	8,24	8,90	11,10	12,00	20,81	22,50
Reaktorgebäude	"		9,72	10,46	12,83	13,80	16,93	18,22
restliche Gebäude	"		22,17	22,58	23,76	24,20	25,47	25,94
Bauteil			40,13	41,94	47,69	50,00	63,21	66,66

Zusammenstellung der direkten Anlagekosten (Fortsetzung)

Tab.: 3.42.3	Reaktortyp : Siedewasser - Reaktor							
	direkte Anlagekosten							
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage		Kostenangaben in 10 ⁶ DM					
Leistung in MW _e , netto			250	300	500	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise		3.41.5	2	3	4	5	9	10
nukl. Dampferzeugungssystem	Tabelle	3.42.1	45,15	54,51	76,42	89,05	138,57	158,36
nukleare Nebenanlagen	"	3.42.1	7,05	7,87	10,76	12,02	16,42	18,57
konventioneller Kraftwerksteil	"	3.42.2	62,81	70,89	99,73	112,70	193,88	219,45
Bauteil	"	3.42.2	40,13	41,94	47,69	50,00	63,21	66,66
Summe			155,14	175,21	234,60	263,77	412,08	463,04
kalkulatorische Zuschläge in %			5	5	4	4	3	3
kalkulatorische Zuschläge			7,76	8,76	9,38	10,55	12,36	13,89
gesamte direkte Anlagekosten			162,90	183,97	243,98	274,32	424,44	476,93
spez. Anlagekosten DM/ kW _e			651,6	613,2	488,0	457,2	424,4	397,4

3.4.3 Zusammenstellung der direkten Anlagekosten von Kraftwerken mit Druckwasser - Reaktoren

Die Tabellen 3.43.1 bis 3 enthalten die Kostenaufstellungen der „direkten Anlagekosten“ von Kraftwerken mit Druckwasser - Reaktoren. Die kalkulatorischen Zuschläge in Tabelle 3.43.3 wurden nach den in Abschnitt 3.4.2 erläuterten Gesichtspunkten bemessen.

Gegenüber der Globalabschätzung in Abschnitt 3.2.2 liegen die Kosten von Anlagen mit $N > 600 \text{ MW}_e$ höher, die von Anlagen mit $N < 600 \text{ MW}_e$ niedriger als die dort geschätzten. Nach der Detailuntersuchung würde sich also ein steilerer Kostengradient als der in Abschnitt 3.2.2 geschätzte ergeben.

Zur Bewertung der in dieser Zusammenstellung aufgeführten Kosten muß erwähnt werden, daß sie aus Mangel an detaillierten Informationen häufig aus Kostenangaben für Siedewasser - Reaktor - Anlagen abgeleitet worden sind. Dies gilt besonders für viele Komponenten des konventionellen Kraftwerkteils und des Bauteils.

Der im Abschnitt 3.4.2 angeführte Hinweis auf den Unterschied zwischen „direkten“ und „gesamten Anlagekosten“ ist auch hier zu berücksichtigen.

Zusammenstellung der direkten Anlagekosten

Tab.: 3.43.1.	Reaktortyp : Druckwasser - Reaktor								
	nukleares Dampferzeugungssystem, Hilfs- und Nebenanlagen								
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage	Kostenangaben in 10 ⁶ DM							
				250	300	500	600	600	1000
Leistung in MW _e , netto			250	300	500	600	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.6	2	2	3	3	4	6	7
Reaktordruckgefäß	Tabelle	3.41.2	5,55	6,43	9,17	12,29	12,29	18,51	22,01
Einbauten	Gleichung	3.3.12.6	2,13	2,42	3,46	3,93	3,93	5,78	6,71
Steuerstabeinrichtung	Tabelle	3.41.4	2,72	3,03	4,01	4,40	4,40	5,95	6,64
Wasserchemie	Gleichung	3.3.19.1	0,70	0,80	1,14	1,30	1,30	1,86	2,11
Druckhaltesystem	Gleichung	3.3.16.1	1,01	1,10	1,38	1,50	1,50	1,89	2,05
Umwälzkreis	Tabelle	3.41.6	17,60	17,60	26,40	26,40	35,20	52,80	61,60
elektrotechnische Ausrüstung	Tabelle	3.41.8	13,20	13,20	19,80	19,80	26,40	39,60	46,20
Instrumentierung	Gleichung	3.3.182.6	5,31	5,69	6,90	7,40	7,40	9,07	9,86
Hilfs- und Nebenanlagen	Gleichung	3.3.1.103.2	8,17	9,11	12,37	13,80	13,80	19,07	21,71
nukl. Dampferzeugungssystem			56,39	59,38	84,63	90,82	106,22	154,53	178,89

Zusammenstellung der direkten Anlagekosten

Tab.: 3.43.2	Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor								
	konventioneller Kraftwerksteil, Bauteil								
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage	Kostenangaben in 10 ⁶ DM							
				250	300	500	600	600	1000
Leistung in MW _e , netto			250	300	500	600	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.6	2	2	3	3	4	6	7
Turbo - Generator - Satz	Gleichung	3.3.21.5	29,48	32,97	45,01	50,30	50,30	90,02	100,60
Rohrl., Armaturen, Vorwärmer	"	3.3.22.1	10,93	12,75	19,70	23,00	23,00	39,37	45,93
Kühlwasseranlagen	"	3.3.24.3	1,53	1,74	2,44	2,76	2,76	3,94	4,50
elektrotechnische Anlagen	"	3.3.26.2	12,35	13,92	19,51	22,00	22,00	38,99	44,00
Instrumentierung	"	3.3.27.1	2,00	2,26	3,19	3,60	3,60	6,36	7,19
Nebenanlagen	"	3.3.25.2	6,51	7,26	9,86	11,00	11,00	15,17	17,15
konventioneller Kraftwerksteil			62,80	70,90	99,71	112,66	112,66	193,85	219,37
Maschinenhaus	"	3.3.31.5	8,24	8,90	11,10	12,00	12,00	20,81	22,50
Reaktorgebäude			9,72	10,46	12,83	13,80	13,80	16,93	18,22
restliche Gebäude			22,17	22,58	23,76	24,20	24,20	25,47	25,94
Bauteil			40,13	41,94	47,69	50,00	50,00	63,21	66,66

Zusammenstellung der direkten Anlagekosten (Fortsetzung)

Tab.: 3.43.3		Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor							
		direkte Anlagekosten							
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage	Kostenangaben in 10 ⁶ DM							
Leistung in MW _e , netto		250	300	500	600	600	1000	1200	
Zahl der Reaktoren		1	1	1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen		1	1	1	1	1	2	2	
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle 3.41.6	2	2	3	3	4	6	7	
nukl. Dampferzeugungssystem + Hilfs- und Nebenanlagen	" 3.43.1	56,39	59,38	84,63	90,82	106,22	154,53	178,89	
konventioneller Kraftwerksteil	" 3.43.2	62,80	70,90	99,71	112,66	112,66	193,85	219,37	
Bauteil	" 3.43.2	40,13	41,94	47,69	50,00	50,00	63,21	66,66	
Summe		159,32	172,22	232,03	253,48	268,88	411,59	464,92	
kalkulatorische Zuschläge in %		5	5	4	4	4	3	3	
kalkulatorische Zuschläge		7,97	8,61	9,28	10,14	10,76	12,35	13,95	
gesamte direkte Anlagekosten		167,29	180,83	241,31	263,62	279,64	423,94	478,87	
spez. Anlagekosten in DM/kW _e		669,1	602,8	482,6	439,4	466,0	423,9	399,0	

4 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

In dem vorliegenden Bericht sind die Anlagekosten von Kernkraftwerken mit Siedewasser - und Druckwasser - Reaktoren, ausgehend von den z. Z. üblichen spezifischen Auslegungsdaten des Reaktorkerns unter Berücksichtigung der als gesichert anzusehenden technischen Entwicklungen, analysiert worden.

Die numerischen Ergebnisse dieser Analyse sind für einige ausgewählte Kraftwerksnettoleistungen im Bereich

$$200 \text{ MW}_e \leq N_{\text{el., netto}} \leq 1200 \text{ MW}_e$$

in tabellarischer Form in den Abschnitten 3.4.2 und 3.4.3 angegeben. Diese Ergebnisse beziehen sich auf den derzeitigen Entwicklungsstand.

In den folgenden Kapiteln dieser Zusammenfassung sollen die Ergebnisse der Analyse in möglichst knapper Form einigermaßen umfassend dargestellt werden.

Der Abschnitt 4.1 enthält eine allgemeine Darstellung der direkten Anlagekosten und die Abschätzung der gesamten Anlagekosten.

In den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 werden die in nächster Zukunft möglichen Senkungen der direkten Anlagekosten abgeschätzt.

4.1 Die Anlagekosten von Kernkraftwerken mit Siedewasser - und Druckwasser - Reaktoren nach dem derzeitigen Entwicklungsstand

Den Darstellungen dieses Abschnittes sind die in den Tabellen 3.42.1...3 und 3.43.1...3 für einige spezielle Kraftwerksnettoleistungen und Kraftwerkskompositionen angegebenen Ergebnisse der Analyse zugrunde gelegt worden.

Um den in den Diagrammen Abb. 4.1.1 und 4.1.2 wiedergegebenen Verlauf der spezifischen Anlagekosten den Ergebnissen der Analyse gemäß darstellen zu können, ohne für jeden Punkt des Diagrammes eine zeitraubende Detailzusammenstellung entsprechend dem Muster des Abschnittes 3.4 f. f. anzufertigen, wurde folgende spezielle Näherungsgleichung in der Form der Gleichung 2.52.4 aufgestellt und deren freie Konstanten den Werten der Tabelle 3.42.1...3 und 3.43.1...3 angepaßt.

$$\frac{K_A}{K_{A_0}} = P_{R_0} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{m_1} + P_{K_0} \sum_i Z_{K_i} Z_{R_i} + P_{R_2} \sum_i Z_{R_i} \left(\frac{N_{R_i}}{N_0} \right)^{m_2} + P_{K_3} \sum_j Z_{T_j} \left(\frac{N_{T_j}}{N_0} \right)^{m_3}$$

4.1.1

mit

- K_A = direkte Anlagekosten
- K_{A_0} = direkte Anlagekosten der Vergleichsanlage
- N = elektrische Nettoleistung
- N_0 = elektrische Nettoleistung der Vergleichsanlage
- N_{R_i} = elektrische Nettoleistung eines Reaktors
- N_{T_j} = elektrische Nettoleistung eines Turbo - Generator - Satzes
- N_K = elektrische Nettoleistung je Kreislauf
- Z_{K_i} = Zahl der Einheitskreisläufe gleicher Leistung = $\frac{N_{R_i}}{N_{K_i}}$
- Z_{R_i} = Zahl der Reaktoren gleicher Leistung N_{R_i}
- Z_{T_j} = Zahl der Turbo - Generator - Sätze gleicher Leistung N_{T_j}

p_{K_o} = Kostenanteil eines Kreislaufes an den direkten Anlagekosten der Vergleichsanlage

p_{kK_o} = Kostenanteil des konventionellen Kraftwerkteiles an den direkten Anlagekosten der Vergleichsanlage

p_{nD_o} = Kostenanteil des nuklearen Dampferzeugungssystems an den direkten Anlagekosten der Vergleichsanlage

p_{R_o} = Kostenanteil der restlichen Anlageteile an den Kosten der Vergleichsanlage

m_n = Degressionsexponenten

Die Gleichung 4.1.1 ist für eine differenzierte Schätzung der direkten Anlagekosten von Druckwasser - und Siedewasser - Reaktoren zu verwenden.

Die Leistung der Vergleichsanlage wird einheitlich für beide Typen zu

$$\underline{\underline{N_o = 600 \text{ MW}_{e, \text{ netto}}}}$$

festgesetzt.

Die Konstanten der Gleichung 4.1.1 nehmen für die einzelnen Typen folgende Werte an

1) Druckwasser - Reaktor - Anlage

Daten der Vergleichsanlage:

$$N_o = N_R = N_T = 600 \text{ MW}_{e, \text{ netto}} \quad N_K = 200 \text{ MW}_{e, \text{ netto}}$$

$$Z_R = Z_T = 1 \quad Z_K = 3$$

$$\underline{\underline{K_{A_o} = 264 \cdot 10^6 \text{ DM}}}$$

$$p_{R_o} = 0,182$$

$$p_{kK_o} = 0,0584$$

$$p_{nD_o} = 0,222$$

$$p_{K_o} = 0,421$$

N	m ₁	m ₂	m ₃
<600 MW _e	0,26	0,58	0,65
>600 MW _e	0,37	0,61	

2) Siedewasser - Reaktor - Anlagen

Daten der Vergleichsanlage:

$$N_O = N_R = N_T = 600 \text{ MW}_e, \text{ netto} \quad N_K = 120 \text{ MW}_e, \text{ netto}$$

$$Z_R = Z_T = 1 \quad Z_K = 5$$

$$K_{A_O} = 274 \cdot 10^6 \text{ DM}$$

$$P_{R_O} = 0,197$$

$$P_{K_O} = 0,017$$

$$P_{nD_O} = 0,314$$

$$P_{kK_O} = 0,404$$

N	m ₁	m ₂	m ₃
<600 MW _e	0,31	0,63	0,65
>600 MW _e	0,37	0,70	

Voraussetzung für die Gültigkeit der Gleichung 4.1.1 ist die Verwendung von Einheitskreisläufen gleicher Leistung bei allen Reaktoren. Sonst ist die Zusammensetzung beliebig! Es können z. B. auch mehrer Reaktoren und Turbosätze unterschiedlicher Leistung kombiniert werden.

Innerhalb dieser Zusammenfassung wird die Gleichung 4.1.1 zur Darstellung des Kostenverlaufes der in diesem Bericht besonders analysierten Spezialfälle mit einem Reaktor je Kraftwerk im gesamten untersuchten Leistungsbe-

reich, einer Turbo - Generator - Anlage im Bereich $N \leq 600 \text{ MW}_e$ und zwei Turbo - Generator - Anlagen im Bereich $600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$ verwendet.

Der Analyse wurden folgende Werte für die Leistung je Einheitskreislauf zugrunde gelegt:

$$N_K = 150 \dots 180 \dots \underline{200} \text{ MW}_e \quad (\text{Druckwasser - Reaktoren})$$

$$N_K = 110 \dots \underline{125} \text{ MW}_e \quad (\text{Siedewasser - Reaktoren})$$

In den Abbildungen 4.1.1 und 4.1.2 ist der Verlauf der spezifischen direkten Anlagekosten (Kurve 1) für Druckwasser - bzw. Siedewasser - Reaktoren, der sich mit den oben getroffenen Annahmen ergibt, dargestellt.

Die Abbildung 4.1.1 zeigt deutlich die infolge der großen Leistungsstufung der Einheitskreisläufe von Druckwasser - Reaktoren auftretenden Kostensprünge,

Um die Größenordnung der gesamten Anlagekosten im Vergleich zu den direkten Anlagekosten zu veranschaulichen, ist in den Abbildungen 4.1.1 und 2 ein Bereich für die indirekten Kosten eingetragen, der sich aus folgender Abschätzung ergibt:

allgemeine Kosten (Baugrund, Erschließung, Unvorhergesehenes usw.)	ca.	10...15%
---	-----	----------

Bauzinsen je nach Bauzeit, Zinssatz und Verteilung des Kapitalbedarfs während der Bauzeit	ca.	11...14%
---	-----	----------

Steuern	ca.	4%
---------	-----	----

indirekte Kosten in % der direkten Anlagekosten	ca.	25...33%
---	-----	----------

Abb. 4.11

spezifische Anlagekosten von
Kernkraftwerken mit
Druckwasser-Reaktoren

Daten: $Z_R = 1$ im Bereich $N \leq 1200 \text{ MW}_e$
 $Z_T = 1$ " " $N \leq 600 \text{ MW}_e$
 $Z_T = 2$ " " $600 \text{ MW}_e < N \leq 1200 \text{ MW}_e$
 $N_K = 200 \text{ MW}_e$

k

1000

500 DM/kW

indirekte

direkte

0

300

600

900 MW_e , netto

1200

N

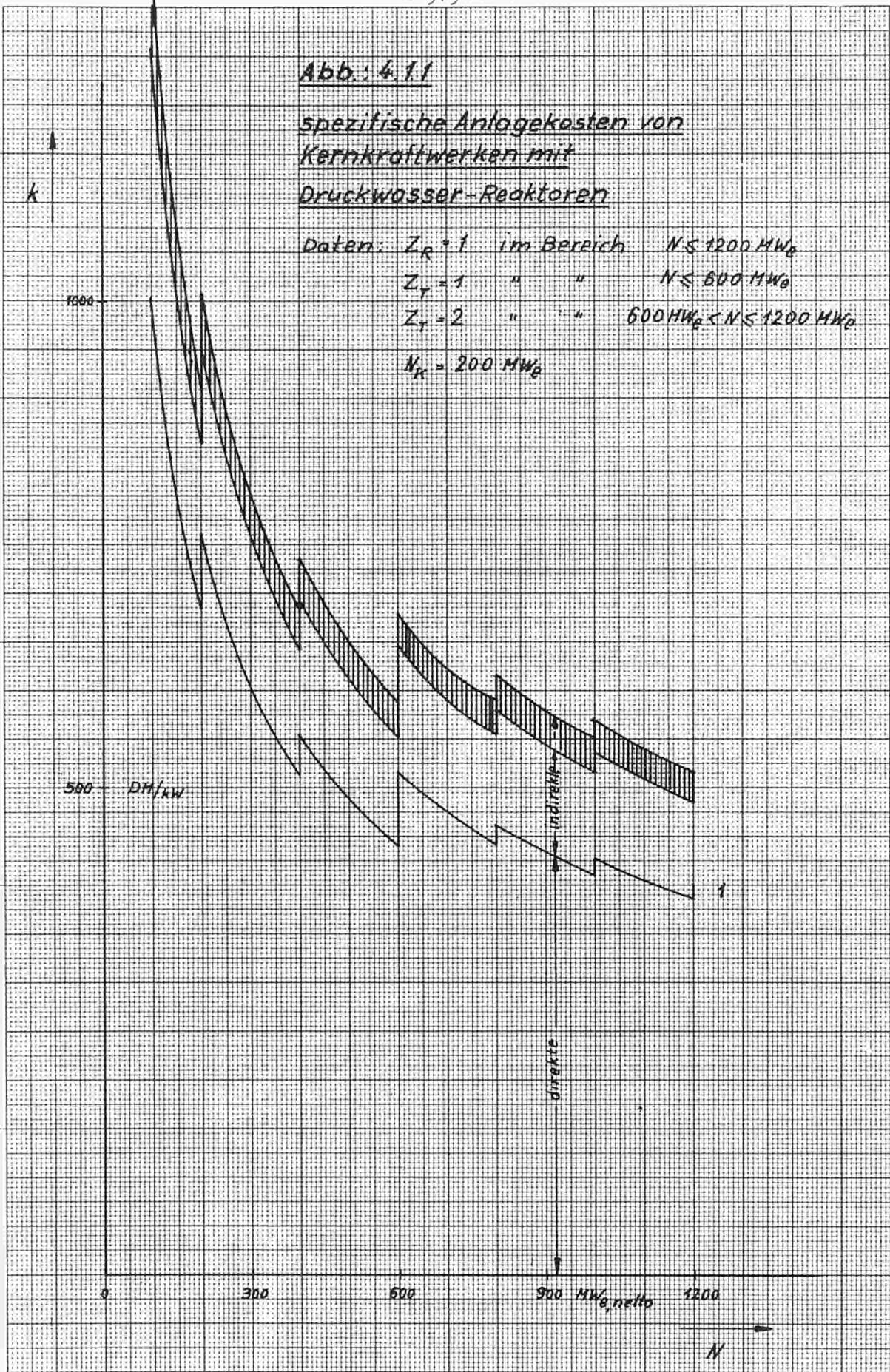
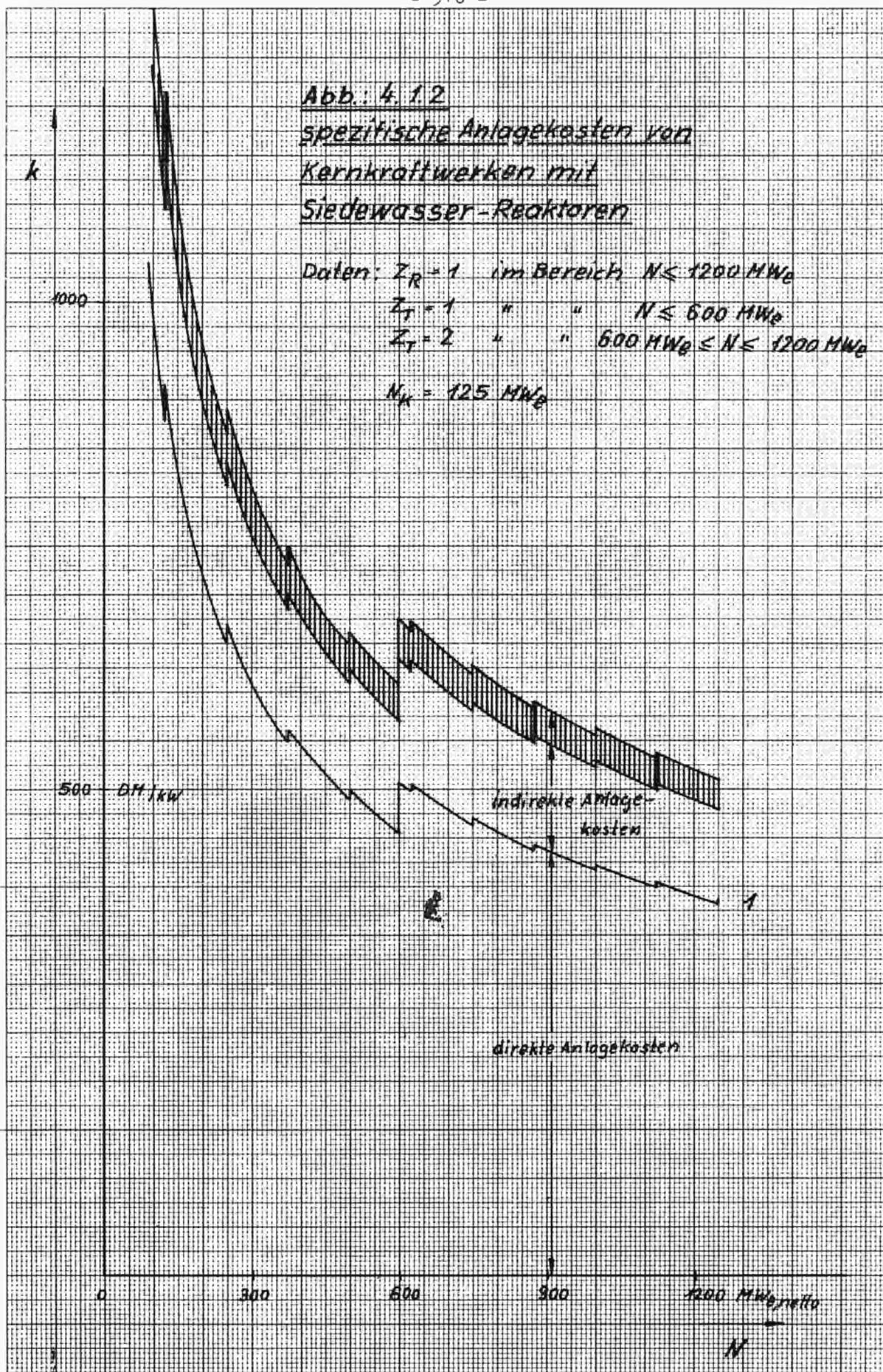


Abb.: 4.12
spezifische Anlagekosten von
Kernkraftwerken mit
Siedewasser-Reaktoren

Daten: $Z_R = 1$ im Bereich $N \leq 1200 \text{ MW}_e$
 $Z_T = 1$ " " $N \leq 600 \text{ MW}_e$
 $Z_T = 2$ " " $600 \text{ MW}_e \leq N \leq 1200 \text{ MW}_e$
 $N_K = 125 \text{ MW}_e$



4.2 Möglichkeiten und Umfang der Anlagekostensenkung

Die Möglichkeiten zur Senkung der Kosten eines Anlageteiles hängen hauptsächlich von der Ausgereiftheit seiner Konstruktion und dem bei seiner Herstellung erreichten Grad der Rationalisierung ab. Kostensenkungen sind daher in größerem Umfang nur bei Anlageteilen zu erwarten, über die nur geringe Konstruktions- und Betriebserfahrungen vorliegen. Dies trifft besonders für viele Teile des nuklearen Dampferzeugungssystems zu.

In welchem Maße Kostenänderungen der einzelnen Anlageteile die gesamten direkten Anlagekosten beeinflussen können, geht aus der in den Tabellen 4.21.1 bis 3 und 4.22.1 bis 3 gegebenen prozentualen Aufteilung der direkten Anlagekosten hervor.

Dieser Aufstellung ist zu entnehmen, daß sich sowohl bei Druck- als auch bei Siedewasser - Reaktoren der Kostenanteil des nuklearen Dampferzeugungssystems einschließlich der Hilfs- und Nebenanlagen zwischen ca. 33% bei 250 MW_e und ca. 37% bei 1200 MW_e bewegt. Die Kosten des konventionellen Kraftwerkteiles beanspruchen mit ca. 38% bei 250 MW_e und ca. 46% bei 1200 MW_e den größten Teil der direkten Anlagekosten.

Betrachtet man den konventionellen Kraftwerksteil und den Bauteil als verhältnismäßig ausgereifte Konstruktionsteile, dann werden sich eventuelle Kostensenkungen im wesentlichen aus Einsparungen bei den Kosten des nuklearen Dampferzeugungssystems ergeben müssen.

Da die Kosten dieses Systems lediglich etwas mehr als ein Drittel der direkten Anlagekosten betragen, sind größere Senkungen der Anlagekosten nicht zu erwarten.

Die in nächster Zukunft möglichen Kostensenkungen im nuklearen Dampferzeugungssystem sind in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 für die beiden untersuchten Reaktortypen zusammengestellt worden. Im folgenden sollen die Verbilligungsmöglichkeiten für die Kosten des konventionellen Kraftwerkteiles und des Bauteiles beider Typen gemeinsam diskutiert werden.

Bismit diese Anlagekomponenten als „konventionell“ im Sinne des Wortes bezeichnet werden können, sind keine Kostensenkungen zu erwarten. Das gilt für die elektrischen Anlagen, die Aggregate und Rohrleitungen des Wärmekreises sowie für die Hilfs- und Nebenanlagen. Die Kosten der Instrumentierung werden im Zuge der Automatisierung der Kraftwerke eher eine steigende als eine fallende Tendenz aufweisen.

Auch beim Bauteil sind keine Kostensenkungen zu erwarten, es sei denn, man geht zur „Freiluftaufstellung“ einzelner Komponenten, z. B. des Turbo - Generator - Satzes, über.

Die einzige Anlagekomponente, bei der nennenswerte Kosteneinsparungen möglich sind, ist der Turbo - Generator - Satz. Über Bau und Konstruktion derart großer Aggregate liegen bei der deutschen Industrie bisher noch keine Erfahrungen vor. Es ist daher anzunehmen, daß das dadurch entstehende Risiko in den derzeitigen Angebotspreisen berücksichtigt worden ist. Mit wachsender Erfahrung wäre eine Senkung des Angebotspreises also durchaus denkbar.

Für eine überschlägige Schätzung soll eine Senkung der Kosten des Turbo - Generator - Satzes von 10...15% angenommen werden.

4.2.1 Möglichkeiten und Umfang der Anlagekostensenkung bei Kernkraftwerken mit Siedewasser - Reaktoren

In diesem Abschnitt sollen die in den verschiedenen Abschnitten der Analyse aufgezeigten Möglichkeiten einer Kostensenkung noch einmal zusammengefaßt und ihre Auswirkung auf die Anlagekosten abgeschätzt werden.

Für die einzelnen Anlagekomponenten des nuklearen Dampferzeugungssystems ergeben sich folgende Verbilligungsmöglichkeiten:

1) Reaktordruckgefäß (Abschnitt 3.3.1.1.8)

Die Verwendung von Stählen höherer Festigkeit ermöglicht eine Verringerung der Wandstärke. Damit ist jedoch nicht unbedingt eine Kostensenkung verbunden, da der Preis dieser Stähle höher liegen wird.

Änderung der Berechnungs- und Prüfungsvorschriften.

Durch Erhöhung der Leistungsdichte kann der Druckgefäßdurchmesser verkleinert werden. Die Verringerung der Steuerstabzahl bedeutet eine geringere Anzahl von Durchführungen und Stützen.

Dünnere Schweißplattierung.

Die Höhe der Kostensenkung soll näherungsweise zu 15...20% der Kosten des Reaktordruckgefäßes angenommen werden.

2) Steuerstabeinrichtung (Abschnitt 3.3.1.3.4)

Verringerung der Steuerstabzahl durch vergrößerte Steuerstabteilung.

Mit den Annahmen in Abschnitt 3.3.1.3.4 ergibt sich eine Senkung der Kosten der Steuerstabeinrichtung von ca. 20...30%.

Eine weitere Kostensenkung durch Rationalisierung der Serienfertigung ist wahrscheinlich möglich.

3) Umwälzkreis (Abschnitt 3.3.1.4.1)

Verringerung der Durchsatzmenge um ca. 40% durch Erhöhen des Dampf - Wasser - Gewichtsverhältnisses von 0,1 auf 0,18.

Unter Beibehaltung der Durchsatzmenge je Einheitsschleife würde sich die Zahl der Kreisläufe ändern,

oder

Erhöhung der Durchsatzmenge je Einheitsschleife von 6000 t/h auf 9000 t/h entsprechend einer Leistung von $N_K = 160...180 \text{ MW}_e$ je Einheitsschleife unter Beibehaltung des Dampf - Wasser - Gewichtsverhältnisses.

Anstelle dieser Lösungen wird neuerdings eine vollständige oder teilweise Integration der Pumpen des Umwälzkreises in das Reaktordruckgefäß in Erwägung gezogen.

Nimmt man näherungsweise an, daß durch eine vollintegrierte Bauweise lediglich die Kosten der Rohrleitungen und Armaturen der Umwälzkreise eingespart werden, dann ergibt sich aus Tabelle 3.41.5 eine Einsparung von ca. 30% der Kosten des Umwälzkreises. Die möglichen Einsparungen durch die vollintegrierte Bauweise sollen für die Abschätzung zu 30...35% der Kosten des Umwälzkreises angenommen werden.

4) Hilfs- und Nebenanlagen des nuklearen Dampferzeugungssystems

Bei den Hilfs- und Nebenanlagen ist durch den mit zunehmender Betriebserfahrung möglichen Abbau der Sicherheitsvorschriften mit Kostensenkungen zu rechnen. Im Rahmen der Abschätzung sollen sie zu ca. 15...20% angesetzt werden.

In der Tabelle 4.21.4 sind die hier diskutierten Verbilligungsmöglichkeiten mit Hilfe der Tabellen 4.21.1 bis 3 in Prozent der direkten Anlagekosten ausgedrückt. Insgesamt sind nach dieser Schätzung 6...10%ige Kostensenkungen möglich. Die sich daraus ergebenden spezifischen Anlagekosten wurden in der letzten Zeile der Tabelle 4.21.4 aufgeführt.

Prozentuale Aufteilung der direkten Anlagekosten

Tab.: 4.21.1	Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor							
	Nukleares Dampferzeugungssystem, Hilfs- und Nebenanlagen							
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage		Kostenanteil in % der gesamten direkten Anlagekosten					
Leistung in MW _{e,netto}			250	300	500	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.5	2	3	4	5	9	10
Reaktordruckgefäß	"	3.42.1	4,09	4,20	4,88	5,11	5,28	5,58
Einbauten	"	"	2,24	2,26	2,43	2,45	2,31	2,38
Steuerstabeinrichtung	"	"	4,92	5,04	5,80	5,97	5,99	6,26
Umwälzkreis	"	"	2,95	3,91	3,93	4,37	5,09	5,03
elektrotechn.Ausrüstung	"	"	2,82	3,75	3,77	4,19	4,88	4,82
Instrumentierung	"	"	3,67	3,42	3,32	2,76	2,73	2,73
Hilfssysteme	"	"	7,02	6,93	7,10	7,04	6,34	6,40
nukl. Dampferzeugungssystem	"	"	27,72	29,62	31,32	32,46	32,65	33,20
Druckabbausystem	"	"	2,32	2,30	2,38	2,37	2,10	2,09
Restteil	"	"	2,01	1,98	2,03	2,01	1,77	1,80
nukleare Nebenanlagen	"	"	4,33	4,28	4,41	4,38	3,87	3,89

Prozentuale Aufteilung der direkten Anlagekosten (Fortsetzung)

Tab.: 4.21.2	Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor							
	konventioneller Kraftwerksteil, Bauteil							
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage		Kostenanteil in % der gesamten direkten Anlagekosten					
Leistung in MW _e , netto			250	300	500	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.5	2	3	4	5	9	10
Turbo-Generator-Satz	"	3.42.2	17,18	16,97	17,38	17,24	19,98	19,84
Rohrl., Armaturen, Vorwärmer	"	"	6,71	6,93	8,07	8,38	9,28	9,63
Kondensatreinigung	"	"	0,93	0,95	1,08	1,11	1,24	1,27
Kühlwasseranlagen	"	"	0,94	0,95	1,00	1,01	0,93	0,94
elektrotechn. Anlagen	"	"	7,58	7,57	8,00	8,02	9,19	9,23
Instrumentierung	"	"	1,23	1,23	1,31	1,31	1,50	1,51
Nebenanlagen	"	"	4,00	3,95	4,04	4,01	3,57	3,60
Konventioneller Kraftwerksteil	"	"	38,56	38,53	40,88	41,08	45,68	46,01
Maschinenbau	"	"	5,06	4,84	4,55	4,37	3,90	4,72
Reaktorgebäude	"	"	5,97	5,69	5,26	5,03	3,99	3,82
restliche Gebäude	"	"	13,61	12,27	9,74	8,82	6,00	5,44
Bauteil	"	"	24,63	22,80	19,55	18,22	14,89	13,98

Prozentuale Aufteilung der direkten Anlagekosten (Fortsetzung)

Tab.: 4.21.3	Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor							
	direkte Anlagekosten							
Bezeichnung	Berechnungsgrundl.	Kostenanteil in % der gesamten direkten Anlagekosten						
Leistung in MW _{e,netto}			250	300	500	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.5	2	3	4	5	9	10
nukl. Dampferzeugungssystem	"	3.42.3	27,72	29,62	31,32	32,46	32,65	33,20
nukleare Nebenanlagen	"	"	4,33	4,28	4,41	4,38	3,87	3,89
konventioneller Kraftwerksteil	"	"	38,56	38,53	40,88	41,08	45,68	46,01
Bauteil	"	"	24,63	22,80	19,55	18,22	14,89	13,98
Summe	"	"	95,24	95,24	96,16	96,16	97,09	97,09
kalkulatorische Zuschläge	"	"	4,76	4,76	3,84	3,84	2,91	2,91
gesamte direkte Anlagekosten	"	"	100	100	100	100	100	100

Mögliche Kostensenkungen

Tabelle 4.21.4		Reaktortyp: Siedewasser - Reaktor				
Angaben in Prozent der direkten Anlagekosten						
Leistung	250	300	500	600	1000	1200
Reaktordruckgefäß	0,61...0,82	0,63...0,84	0,73...0,98	0,77...1,02	0,79...1,06	0,84...1,12
Steuerstabeinrichtung	0,98...1,48	1,01...1,51	1,16...1,74	1,19...1,79	1,20...1,80	1,25...1,88
Umwälzkreis	0,89...1,03	1,17...1,37	1,18...1,38	1,31...1,53	1,53...1,78	1,51...1,76
Hilfs- und Nebenanlagen	1,70...2,27	1,68...2,24	1,73...2,30	1,71...2,28	1,53...2,04	1,54...2,06
Turbo - Generator - Satz	1,72...2,58	1,70...2,55	1,74...2,61	1,72...2,59	2,00...3,00	1,98...2,98
gesamte Kostensenkung	5,90...8,18	6,19...8,51	6,54...9,01	6,70...9,21	7,05...9,68	7,12...9,80
spez. Anlagekosten DM/kW _e	613,2...598,3	575,2...561,0	456,1...444,0	426,6...415,1	394,5...383,3	369,1...358,5

4.2.2 Möglichkeiten und Umfang der Anlagekostensenkung bei Kernkraftwerken mit Druckwasser - Reaktor

Die in der Analyse aufgezeigten Möglichkeiten der Kostensenkung sollen an dieser Stelle zusammenhängend aufgeführt und ihre Auswirkung auf die Anlagekosten abgeschätzt werden.

Für die unten aufgeführten Anlagekomponenten des nuklearen Dampferzeugungssystems ergeben sich folgende Verbilligungsmöglichkeiten:

1) Reaktordruckgefäß (Abschnitt 3.3.1.1.8)

Hier ergeben sich die unter 4.2.1 aufgeführten Verbilligungsmöglichkeiten mit Ausnahme des Fortfalls von Steuerstabdurchführungsstützen.

Die mögliche Höhe der Einsparungen soll mit 10...15% geschätzt werden.

2) Der Umwälzkreis (Abschnitt 3.3.1.4.1)

Die Zahl der Umwälzkreisläufe läßt sich praktisch nur durch eine Erhöhung der Aufwärmspanne verringern.

Den Kostenabschätzungen im Abschnitt 3.4.1, Tabelle 3.41.6 sind bis auf eine Ausnahme die Temperaturdifferenz von 27 °C zugrunde gelegt. Wie ausgeführte Beispiele zeigen, sind Temperaturdifferenzen von 32 °C möglich (siehe SELNI Tabelle 3.3.14.2). Bei einer Aufwärmspanne von 30 °C lassen sich bis zu 200 MW_e je Kreislauf übertragen. Derartig große Leistungen je Einheit ermöglichen nur schlecht eine Anpassung an einen großen Leistungsbereich und sind nur für spezielle Nennleistungen sinnvoll. Die Einsparungen durch die Erhöhung der Einheitsleistung machen sich daher nur bei großen Nennleistungen bemerkbar. Bei der Einsparung eines Kreislaufes einschließlich der Antriebsmaschine verringern sich die Anlagekosten um ca. $15,4 \cdot 10^6$ DM.

3) Hilfs- und Nebenanlagen des nuklearen Dampferzeugungssystems

Für die Hilfs- und Nebenanlagen gilt das in Abschnitt 4.2.1 Absatz 4 Gesagte. Zur Abschätzung der möglichen Kostensenkungen werden auch hier etwa 15...20% angesetzt.

In der Tabelle 4.22.4 sind die in diesem Abschnitt diskutierten Verbilligungsmöglichkeiten mit Hilfe der Tabellen 4.22.1...3 in Prozent der direkten Anlagekosten aufgeführt.

Die letzte Zeile enthält die spezifischen Anlagekosten. Ein Vergleich mit Tabelle 4.21.4 zeigt, daß die Anlagekosten von Druckwasser - Reaktor - Anlagen sich im untersuchten Leistungsbereich nicht wesentlich von den Anlagekosten der Siedewasser - Reaktor - Anlagen unterscheiden.

Prozentuale Aufteilung der direkten Anlagekosten

Tab.: 4.22.1	Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor								
	nukleares Dampferzeugungssystem, Hilfs- und Nebenanlagen								
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage	Kostenanteil in % der gesamten direkten Anlagekosten							
Leistung in MW _{e,netto}			250	300	500	600	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.6	2	2	3	3	4	6	7
Reaktordruckgefäß	"	3.43.1	3,32	3,36	3,80	4,39	4,37	4,60	4,60
Einbauten	"	"	1,27	1,34	1,43	1,49	1,41	1,36	1,40
Steuerstabeinrichtung	"	"	1,63	1,68	1,66	1,67	1,57	1,40	1,39
Wasserchemie	"	"	0,42	0,44	0,47	0,49	0,46	0,44	0,44
Druckhaltesystem	"	"	0,60	0,61	0,57	0,57	0,54	0,45	0,43
Umwälzkreis	"	"	10,52	9,73	10,94	10,01	12,59	12,45	12,86
elektrotechnische Ausrüstung	"	"	7,89	7,30	8,21	7,51	9,44	9,34	9,65
Instrumentierung	"	"	3,17	3,15	2,86	2,81	2,65	2,14	2,06
Hilfs- und Nebenanlagen	"	"	4,88	5,04	5,13	5,23	4,93	4,50	4,53
nukl. Dampferzeugungssystem	"	"	33,71	32,84	35,07	34,45	37,98	36,45	37,36

Prozentuale Aufteilung der direkten Anlagekosten (Fortsetzung)

Tab.: 4.22.2	Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor								
	konventioneller Kraftwerksteil, Bauteil								
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage		Kostenanteil in % der gesamten direkten Anlagekosten						
Leistung in MW _e , netto			250	300	500	600	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.6	2	2	3	3	4	6	7
Turbo-Generator-Satz	"	3.43.2	17,62	18,23	18,65	19,08	17,99	31,23	21,01
Rohrl., Armaturen, Vorwärmer	"	"	6,53	7,05	8,16	8,72	8,22	9,29	9,59
Kühlwasseranlagen	"	"	0,91	0,96	1,01	1,05	0,99	0,93	0,94
elektrotechnische Anlagen	"	"	7,38	7,70	8,09	8,35	7,87	9,20	9,18
Instrumentierung	"	"	1,20	1,25	1,32	1,37	1,29	1,50	1,50
Nebenanlagen	"	"	3,89	4,01	4,09	4,17	3,93	3,58	3,58
konventioneller Kraftwerksteil	"	"	37,20	39,20	41,32	42,74	40,29	45,73	45,81
Maschinenhaus	"	"	4,93	4,92	4,60	4,55	4,29	4,91	4,70
Reaktorgebäude	"	"	5,81	5,78	5,32	5,23	4,93	3,99	3,80
restliche Gebäude	"	"	13,25	12,49	9,85	9,18	8,65	6,01	5,42
Bauteil	"	"	23,99	23,19	19,76	18,96	17,88	14,91	13,92

Prozentuale Aufteilung der direkten Anlagekosten (Fortsetzung)

Tab.: 4.22.3	Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor								
	direkte Anlagekosten								
Bezeichnung	Berechnungsgrundlage		Kostenanteil in % der gesamten direkten Anlagekosten						
Leistung in MW _{e,netto}			250	300	500	600	600	1000	1200
Zahl der Reaktoren			1	1	1	1	1	1	1
Zahl der Turbinen			1	1	1	1	1	2	2
Zahl der Umwälzkreise	Tabelle	3.41.6	2	2	3	3	4	6	7
nukl. Dampferzeugungssystem + Hilfs- und Nebenanlagen	"	3.43.3	33,71	32,84	35,07	34,45	37,98	36,45	37,36
konventioneller Kraftwerksteil	"	"	37,54	39,20	41,32	42,74	40,29	45,73	45,81
Bauteil	"	"	23,99	23,19	19,76	18,96	17,88	14,91	13,92
Summe	"	"	95,24	95,24	96,15	96,15	96,15	97,09	97,09
kalkulatorische Zuschläge	"	"	4,76	4,76	3,85	3,85	3,85	2,91	2,91
gesamte direkte Anlagekosten	"	"	100	100	100	100	100	100	100

Mögliche Kostensenkungen

Tabelle 4.22.4	Reaktortyp: Druckwasser - Reaktor					
	Angaben in Prozent der direkten Anlagekosten					
Leistung	250	300	500	600	1000	1200
Reaktordruckgefäß	0,33...0,50	0,34...0,51	0,38...0,57	0,47...0,70	0,44...0,66	0,46...0,69
Umwälzkreis	-	-	-	-	3,63	3,22
Hilfs- und Nebenanlagen	0,73...0,98	0,76...1,01	0,77...1,03	0,78...1,05	0,68...0,90	0,68...0,91
Turbo - Generator - Satz	1,76...2,64	1,82...2,73	1,87...2,80	1,91...2,86	2,12...3,18	2,10...3,15
gesamte Kostensenkung	2,82...4,12	2,92...4,25	3,02...4,40	3,16...4,61	6,87...8,37	6,46...7,97
spez. Anlagekosten DM/kW _e	650,2...641,5	585,2...577,2	468,0...461,4	425,5...419,1	394,8...388,4	373,2...367,2

4.3 Schlußbemerkungen

Wir hoffen, mit dieser Arbeit einen wichtigen Diskussionsbeitrag zu einer differenzierteren Beurteilung der Anlagekosten von Kernkraftwerken und der Kostenentwicklung der einzelnen Anlagekomponenten in Abhängigkeit von der Kraftwerksleistung zu liefern.

Allen Firmen und Institutionen, die uns bereitwillig Informationen zu unserem Thema zur Verfügung stellten, möchten wir an dieser Stelle unseren Dank aussprechen.

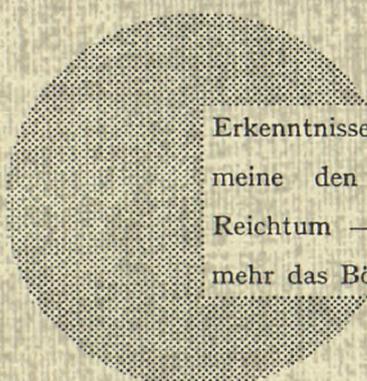
AN UNSERE LESER

Alle Euratom-Berichte werden nach Erscheinen in der von der Zentralstelle für Information und Dokumentation (CID) herausgegebenen Monatszeitschrift **EURATOM INFORMATION** angezeigt. Abonnements (1 Jahr : DM 60) und Probehefte sind erhältlich bei :

Handelsblatt GmbH
"Euratom Information"
Postfach 1102
D-4 Düsseldorf (Deutschland)

oder

Office central de vente des publications
des Communautés européennes
2, Place de Metz
Luxembourg



Erkenntnisse verbreiten ist soviel wie Wohlstand verbreiten — ich meine den allgemeinen Wohlstand, nicht den individuellen Reichtum — denn mit dem Wohlstand verschwindet mehr und mehr das Böse, das uns aus dunkler Zeit vererbt ist.

Alfred Nobel

VERTRIEBSSTELLEN

Alle Euratom-Berichte sind bei folgenden Stellen zu den auf der ersten Rückseite des Umschlags angegebenen Preisen erhältlich (bei schriftlicher Bestellung bitte die EUR-Nummer und den Titel, die beide auf der ersten Umschlagsseite jedes Bericht stehen, deutlich angeben).

PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES

98, Chaussée de Charleroi, Bruxelles 6

Banque de la Société Générale - Bruxelles
compte N° 964.558,

Banque Belgo Congolaise - Bruxelles
compte N° 2444.141,

Compte chèque postal - Bruxelles - N° 167.37,

Belgian American Bank and Trust Company - New York
compte No. 22.186,

Lloyds Bank (Europe) Ltd. - 10 Moorgate, London E.C.2,
Postcheckkonto - Köln - Nr. 160.861.

CDNA02993DEC

OFFICE CENTRAL DE VENTE DES PUBLICATIONS DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

2, place de Metz, Luxembourg (Compte chèque postal N° 191-90)

BELGIQUE — BELGIË

MONITEUR BELGE
40-42, rue de Louvain - Bruxelles
BELGISCH STAATSBLED
Leuvenseweg 40-42 - Brussel

LUXEMBOURG

OFFICE CENTRAL DE VENTE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
9, rue Goethe - Luxembourg

DEUTSCHLAND

BUNDESANZEIGER
Postfach - Köln 1

NEDERLAND

STAATSDRUKKERIJ
Christoffel Plantijnstraat - Den Haag

FRANCE

SERVICE DE VENTE EN FRANCE
DES PUBLICATIONS DES
COMMUNAUTES EUROPEENNES
26, rue Desaix - Paris 15^e

ITALIA

LIBRERIA DELLO STATO
Piazza G. Verdi, 10 - Roma

UNITED KINGDOM

H. M. STATIONARY OFFICE
P. O. Box 569 - London S.E.1

EURATOM — C.I.D.
51-53, rue Belliard
Bruxelles (Belgique)