Inhaltsverzeichnis:

		Seite
1.	EINLEITUNG	1
2.	DER BRENNSTOFFKREISLAUF VON KERNKRAFTWERKEN	12
2.1.	Der offene Brennstoffkreislauf	12
2.1.1.	Natururangewinnung	14
2.1.2.	Konversion und Anreicherung	16
2.1.3.	Fabrikation des Reaktorbrennstoffs	17
2.1.4.	Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor	18
2.1.5.	Zwischenlagerung von Uranbrennelementen	21
2.1.6.	Direkte Endlagerung	21
2.2.	Der geschlossene Brennstoffkreislauf	22
2.2.1.	Wiederaufarbeitung von Uranbrennelementen	22
2.2.2.	Mischoxidfertigung	23
2.2.3.	Fortgeschrittene Kernreaktoren	24
2.2.3.1.	LWR-Plutonium-Brenner	25
2.2.3.2.	Fortgeschrittene Druckwasserreaktoren	27
2.2.3.3.	Schnelle Brutreaktoren	28
2.2.3.4.	Symbiose von fortgeschrittenen Reaktoren	30
2.2.4.	Zwischenlagerung von Mischoxid-Brennelementen	31
2.2.5.	Wiederaufarbeitung von Mischoxid-Brennelementen	32

		Seite
2.3.	Besonderheiten gegenüber fossilen Kraftwerken	32
2.3.1.	Die geographische Lage der Rohstofflagerstätten	33
2.3.2.	Die Wiederverwertbarkeit des abgebrannten Reaktorbrennstoffs	34
2.3.3.	Der sukzessive Aufbau des nuklearen Brennstoffkreislaufs	34
2.3.4.	Die zeitliche und verursachungsgerechte Erfassung der Zahlungsströme	35
2.3.5.	Die Rolle der Kapitalkosten	39
2.3.5.1.	Kapitalintensive Kraftwerkstechnik	41
2.3.5.2.	Kapitalintensive Brennstoffherstellungsverfahren	42
2.3.5.3.	Kaptialintersiver Kernbrennstoff	43
2.3.5.4.	Hoher Finanzmittelbedarf	45
3.	FORMALE BESCHREIBUNG DES NUKLEAREN BRENNSTOFFKREISLAUFS	48
3.1.	Der offene Brennstoffkreislauf	50
3.2.	Der geschlossene Brennstoffkreislauf	53
3.2.1.	Leichtwasserreaktoren mit Schnellen Brütern	54
3.2.2.	Leichtwasserreaktoren mit Fortgeschrittenen Druckwasserreaktoren	60
3.2.3.	Leichtwasserreaktoren in Symbiose mit zwei fortgeschrittenen Reaktoren	61
3.3.	Nebenbedingungen und Zielvorgaben im Brennstoffkreislauf	63
3.4.	Statische Vorgänge mit Zeitverschiebungen	65
3.5.	Ein allgemeines Strategienbeispiel	66
3.6.	Die praktische Handhabbarkeit der abgeleiteten Formeln	68

		Seite
3.7.	Übergang zu einer numerischen Bearbeitungsmethode	70
3.8.	Die Anforderungen an ein Brennstoffkreislaufmodell	73
4.	EIN ALLGEMEINER MODELLANSATZ	75
4.1.	Die Modellgleichungen	75
4.2.	Modelleigenschaften	83
4.2.1.	Dynamik	84
4.2.2.	Statik	86
4.2.3.	Optimierungsfähigkeit	88
4.2.4.	Nicht-Limitationalität	89
4.2.5.	N-dimensionale dynamische Prozesse	90
4.2.6.	Homogenität	91
4.3.	Fehlerintervalle des Modells	92
4.4.	Allgemeines Modell-Eingabe-Raster	101
4.5	Modell-Ausgabe-Masken	102
4.6.	Hinweise auf Anwendungen des Modells außerhalb des nuklearen Brennstoffkreislaufs	103
5.	ÖKONOMISCHE BEWERTUNG DER ENTWICKLUNGSALTERNATIVEN DES NUKLEAREN BRENNSTOFFKREISLAUFS	104
5.1.	Die Entwicklungsalternativen aus strategischer Sicht	105
5.2.	Die Natururanausnutzung im Brennstoffkreislauf mit fortgeschrittenen Reaktoren	109

		Seite
5.2.1.	Die Uranausnutzung in Reaktorsystemen mit LWR und fortgeschrittenen Konverterreaktoren	111
5.2.1.1.	Das Konvertersystem im stationären Zustand	114
5.2.1.2.	Die nichtstationären Phasen des Systems	121
5.2.1.2.1.	Die Systemaufbauphase	121
5.2.1.2.2.	Die Systemabbauphase	122
5.2.1.3.	Die integrale Gesamtausnutzung	123
5.2.2.	Die Uranausnutzung in Reaktorsystemen mit LWR und Schnellen Brutreaktoren	124
5.2.2.1.	Das Brütersystem im stationären Zustand	125
5.2.2.2.	Die Systemauf- und -abbauphasen	127
5.3.	Die Stromerzeugungskosten der fortgeschrittenen Reaktoren - Eine Sensitivätsanalyse	130
5.3.1.	Ergebnisse der Stromkostenkalkulation	131
5.3.2.	Abgrenzung der Ergebnisse zwischen LWR, FDWR und SBR	141
5.4.	Zusammenfassende Betrachtung der Bewertungskriterien	144
5.5.	Einige gesamtwirtschaftliche Aspekte	148
6.	DIE ROLLE DER PLUTONIUMPREISE BEI DER MARKTEINFÜHRUNG DER FORTGESCHRITTENEN REAKTORTECHNIK	150
6.1.	Politische und ökonomische Voraussetzungen	151
6.2.	Formale Voraussetzungen	152
6.3.	Die Determinanten eines Plutoniumpreises	154
6.4.	Wertebereiche eines Plutoniumpreises	164
6.4.1.	Ausgangsdaten für die Kostenparameter	165

		Seite
6.4.2.	Verhaltensannahmen für die Verhandlungspartner	167
6.4.3.	Plutoniumpreisgrenzen aus der Sicht der Verhandlungspartner	168
6.4.4.	"Break-Even-Point" und Verhandlungsspielräume	171
6.4.5.	Plutoniumpreise nach dem "Break-Even-Point"	175
6.4.6.	Geltungsbereich der Plutoniumpreise	180
6.5.	Der Plutoniumpreis als Steuerungsmechanismus für die Wirtschaftlichkeit von fortgeschrittenen Reaktoren	183
6.5.1.	Möglichkeiten in einer zentralisierten Kernenergiewirtschaft	184
6.5.2.	Möglichkeiten bei marktwirtschaftlicher Organisation	186
6.5.2.1.	Möglichkeiten vor dem Erreichen der Wirtschaftlichkeitsschwelle	187
6.5.2.2.	Möglichkeiten nach dem Erreichen der Wirtschaftlichkeitsschwelle	191
6.5.2.3.	Probleme bei Steuerungsmaßnahmen vor dem Erreichen der Wirtschaftlichkeitsschwelle	192
6.5.3.	Gründe und Ansätze für Steuerungsmaßnahmen in der Praxis	194
7.	GESAMTBEWERTUNG	203
LITERATURVERZEICHNIS		206
Anhang		213

Verzeichnis der Abbildungen

			Seite
Abb.	2 - 1	Alternative Brennstoffkreisläufe	13
Abb.	2 - 2	Technische und physikalische Merkmale von DWR und von fortgeschrittenen Reaktoren im Vergleich	26
Abb.	2 - 3	Quantitatives und monetäres Fließbildschema eines Brennstoffkreislaufs mit Fortgeschrittenen Druckwasserreaktoren	37
Abb.	2 - 4	Zeitliche Abfolge der Einnahmen und Ausgaben, Aufwendungen und Erträge	40
Abb.	3 - 1	Schematische Darstellung eines Kernenergiesystems mit LWR und SBR	55
Abb.	3 - 2	Schematische Darstellung eines Kernenergiesystems von LWR in Symbiose mit den fortgeschrittenen Reaktoren FDWR und SBR	61
Abb.	4 - 1	Alternative Modellapproximation einer logistischen Funktion	99
Abb.	5 - 1	Alternative Kernenergiestrategien mit fortgeschrittenen Reaktoren sowie auszugsweise Informationen aus den zugrundeliegenden Brennstoffkreisläufen	106
Abb.	5 - 2	Schematische Darstellung eines Kernenergie zeitalters auf der Basis eines LWR- und FDWR-Reaktormischsystems, dessen spezifischen Natururanbedarfs und spezifischen Natururaneinsparungen im Vergleich zum reinen LWR-System, sowie die jeweilige jährliche Rohstoffausnutzung im Zeitverlauf	112
Abb.	5 - 3	Massenflüsse in einem Brüterbrennstoffkreislauf	126
Abb.	5 - 4	Kalkulationsschema der Stromerzeugungskosten eines Zeitabschnitts	133
Abb.	5 - 5	Stromerzeugungskosten in Konverterreaktoren im Vergleich	136

Abb. 5 - 6 Stromerzeugungskosten in FDWR und SBR im Vergleich 137

Abb. 6 - 1 Plutoniumpreisbildung in einem abgeschlossenen fortgeschrittenen Kernenergiesystem 158

Abb. 6 - 2 Mindestabgabepreise für LWR-Plutonium und Höchsteinkaufspreise für FDWR 169

Abb. 6 - 3 Mindestabgabepreise für LWR-Plutonium und Höchsteinkaufspreise für SBR 170

Abb. 6 - 4 Einbettung des Plutonium-Marktpreises in die "Gewinnzone" zwischen LWR und FDWR/SBR 179

Abb. 6 - 5 Kernenergieprognosen und tatsächliche Installationen in der OECD im Zeitverlauf 196

Verzeichnis der Tabellen

		Seite
Tab. 2 - 1	Uranvorräte der westlichen Welt	15
Tab. 2 - 2	Spezifische Zusammensetzung von DWR-Brennstoff bei der Be- und Entladung des Reaktors	19
Tab. 2 - 3	Natururanvorräte nach Ländergruppen	33
Tab. 2 - 4	Dauer einzelner Brennstoffkreislaufabschnitte in Jahren, differenziert nach Reaktortyp, Ist- und Zielwerten	39
Tab. 2 - 5	Investitionskostenfaktoren für Kraftwerke	41
Tab. 2 - 6	Erwartete Kostenfaktoren für nukleare Brennstoffkreislaufdienste	43
Tab. 2 - 7	Vergleichbare Brennstoffwerte von LWR-, FDWR- und SBR-Reaktorkernen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Brennstoffkreislauf	44
Tab. 4 - 1	Gegenüberstellung der analytisch ermittelten Ergebnisse und der Modellergebnisse als Lösung der Brutreaktorentwicklungsfunktion	97
Tab. 4 - 2	Gegenüberstellung der analytisch ermittelten Ergebnisse und der Modellergebnisse als Lösung der FDWR-Entwicklungsfunktion	98
Tab. 4 - 3	Fehlerintervalle bei unterschiedlichen Zeitschritten	100
Tab. 5 - 1	Energiegewinnungsfaktoren und Natururanausnutzung in alternativen Reaktorsystemen	120
Tab. 5 - 2	Natururanausnutzung und Dauer einer Kernenergieära für unterschiedliche Reaktortypen im Vergleich	129
Tab. 5 - 3	Sensitivitätskoeffizienten der wichtigsten Brennstoffkreislaufkostenparameter	139
Tab. 5 - 4	Präferenztabelle von Kernkraftwerken unter ökonomischen Bewertungskriterien	144

Tab. 5 - 5 Einflußmöglichkeiten anlagenspezifischer Parameter hinsichtlich ökonomischen Kriterien 146

Tab. 6 - 1 Wirtschaftlichkeitsschwellen von SBR und FDWR als Funktion des Uranpreises 174

Tab. 6 - 2 Alternative Plutonium-Marktpreise zwischen LWR und FDWR/SBR als Funktion steigender Uranpreise 178

Tab. A - 1 Brennstoffmassenflüsse als Grundlage zur Berechnung der Brennstoffkreislaufkosten 214

Tab. A - 2 Technische Daten zur Brennstoffhandhabung 215

Tab. A - 3 Wirtschaftliche Eingangsdaten für die Berechnung der Stromgestehungskosten 216