

# Alternativen zum Forschungsreaktor München II - eine Denkschrift

Stand: 19. September 1991

Herausgegeben vom Arbeitskreis  
"Alternativen zum Forschungsreaktor München II"  
am Physik-Department der  
Technischen Universität München/Garching

*Bitte zurück geben!*

## Diese Schrift wird unterstützt von:

Dr.phil.nat. M.Bärmann	Diplombiologe	TUM <sup>1</sup>
J.Bauch	VAe	BL <sup>2</sup>
S.Benkert	StuRa/Physik	TUM
Dr.rer.nat R.Birnstock	Diplomphysiker	BL
R.Brack	StuRa/Physik	TUM
G.Brink	Diplomand (Physik)	TUM
Th.Brumm	Diplomphysiker	TUM
Prof.Dr.rer.nat. K.Bucher	Physiker u. Mathematiker	TUM
W.Dandl	Diplomand (Physik)	TUM
V.Enter	VAe	TUM
E.L.Florin	Diplomphysiker	TUM
T.Franosch	Fachbereichsrat <sup>3</sup> , Senator	TUM
W.Frey	Diplomphysiker	TUM
M.Fritz-Stephan	Diplombiologin	TUM
F.Früh	Fachbereichsrat Physik <sup>3</sup>	TUM
F.Gerauer	Fachschaft/Physik	TUM
R.Gieselmann	Diplombiologe	TUM
B.Goettgens	Diplomphysikerin	TUM
Dr.W.Goldmann	Diplombiochemiker	TUM
H.Gundlach	Diplombiologin	LMU <sup>4</sup>
S.Herrlich	Diplomphysiker	TUM
H.M.Adorf	Diplomphysiker	ESO <sup>5</sup>
J.Käs	Diplomphysiker	TUM
S.Kaufmann	Diplombiologe	TUM
W.Kielmann	Diplomand (Physik)	TUM

Dr.rer.nat J.Klunker	Diplomphysiker	Siemens
Th. Köchy	Diplomphysiker	TUM
U.Kugelmann	StuRa/Physik	TUM
H.Kurzmeier	Diplomchemiker	TUM
R.Lutter	Diplomphysiker	BL
P.Meerwald	Fachbereichsrätin Physik <sup>6</sup>	TUM
R.Merkel	Diplomphysiker	TUM
F.Müller	Diplomphysiker	TUM
Dr.rer.nat O.Müller	Diplomphysiker	LMU
Dr.rer.nat H.Münzer	Diplomphysiker	TUM
T.Muschik	Diplomphysiker	TUM
Ch.Naumann	Diplomphysiker	TUM
L.Noethe	Diplomphysiker	ESO
J.Nützel	Diplomphysiker	TUM
J.Rädler	Diplomphysiker	TUM
M.Radmacher	Diplomphysiker	TUM
Prof.Dr.rer.nat.M.Raich	Physiker	TUM
H.Reinl	Diplomphysiker	TUM
P.Richter	StuRa/Physik	TUM
R.Ritz	Diplomphysiker	TUM
Dr.ing.L.Rohrer	Diplomingenieur	BL
R.Ruddies	Diplomand (Physik)	TUM
K.Schöffel	Diplomphysiker	BL
Prof.Dr.med. R.Scholz	Strahlenmediziner	LMU
Ch.Schuster	StuRa/Physik	TUM
T.Schwinn	Diplomand (Physik)	TUM
I.Sprenger	BTA	TUM

K.Steinberger	Diplomingenieur (FH)	BL
H.Strey	Diplomphysiker	TUM
R.Tillmann	Diplomphysiker	TUM
A.Waibel	Strahlenschutzingenieur	GSF <sup>7</sup>
Ch.Wetzel	Diplomphysiker	TUM
K.Wurzbacher	Diplomphysikerin	Inst.f.Umweltunters. <sup>8</sup>
W.Wurzbacher	Diplommathematiker	IBM/München
M.Ziegler	Diplomphysiker	TUM

<sup>1</sup> TUM Technische Univ. München

<sup>2</sup> BL Beschleunigerlabor der TUM und LMU München/Garching

<sup>3</sup> Studentenvertreter bis Oktober 1991 im Fachbereichsrat Physik/TUM

<sup>4</sup> LMU Ludwigs-Maximilians Univ. München

<sup>5</sup> ESO European Southern Observatory/München

<sup>6</sup> Studentenvertreterin ab Oktober 1991 im Fachbereichsrat Physik/TUM

<sup>7</sup> GSF Gesellschaft f. Strahlen und Umweltforschung

<sup>8</sup> Institut f. Umweltuntersuchungen/Starnberg e.V.

Verantwortliche Redaktion: M. Bärmann, G.Brink, T.Schwinn

# Inhalt:

## Einführung

1. **Reaktoren als Neutronenquellen und ihr Einsatz in der Forschung**
  - 1.1. Bedarf an Neutronenquellen für die Forschung
  - 1.2. Der Münchner Reaktor und seine Bedeutung für die Neutronenphysik
2. **Zur Konzeption des Forschungsreaktors München II**
  - 2.1. Auslegungs- und Sicherheitsaspekte
    - 2.1.1. Auslegung
    - 2.1.2. Technische Sicherheit
    - 2.1.3. Geplante Anwendungen
  - 2.2. Der Betrieb im Rahmen der TUM
    - 2.2.1. Der neue Reaktor und die Lehre
    - 2.2.2. Das Forschungsumfeld des geplanten Reaktorstandortes
    - 2.2.3. Administrative Probleme
  - 2.3. Sicherheitsaspekte des Standortes München
3. **Spallationsquellen als Alternative zu Forschungsreaktoren**
  - 3.1. Konzepte und Beispiele für Spallationsquellen
    - 3.1.1. Der Spallationsprozeß und seine Anwendung bei Neutronenquellen
    - 3.1.2. Die Spallationsquelle ISIS in Oxford
    - 3.1.3. Das Projekt einer Spallationsquelle in Jülich
  - 3.2. Vergleich von Spallationsquellen mit Reaktoren
    - 3.2.1. Kosten
    - 3.2.2. Energieverbrauch
    - 3.2.3. Plutoniumbrüten
    - 3.2.4. Sicherheitsaspekte
    - 3.2.5. Entsorgung
    - 3.2.6. Verfügbarkeit
    - 3.2.7. Eigenschaften im Experimentierbetrieb
    - 3.2.8. "Politische" Betriebssicherheit
  - 3.3. Zusammenfassende Diskussion
4. **Zusammenfassung: Eine Spallationsquelle anstatt des FRMII? Empfehlungen**
5. **Anhang**
  - 5.1. Literatur
  - 5.2. Abkürzungen/Glossar

## Zusammenfassung

Die Planungen für einen neuen Forschungsreaktor an der Technischen Universität München/Garching treten nun in eine entscheidende Phase. Dennoch fand dazu noch kein ausreichender öffentlicher Diskurs statt. Diese von Naturwissenschaftlern des Physik-Departments der Technischen Universität München erstellte Schrift soll einen weiteren Anstoß liefern, diesen Diskurs nun zu führen.

Ausgehend von den wichtigsten Anwendungen von Neutronen - die Neutronenphysik als solche ist jedoch nicht Gegenstand dieser Denkschrift - wird das Konzept des geplanten Münchener Reaktors kritisch untersucht. Dabei zeigt sich, daß der Betrieb einer überregionalen, nationalen Großforschungsanlage, wie sie ein derartiger Reaktor darstellt, die Lehre und den Wissenschaftsbetrieb am geplanten Hochschulstandort (TUM) im Wesentlichen nachteilig beeinflussen würde. Der Standort der geplanten Reaktors am Ballungsraum München ist darüberhinaus u.a. wegen der in der Nähe vorbeiführenden Flugrouten ungünstig.

Neben diesen hochschulpolitischen und standortspezifischen Gesichtspunkten werden Spallationsquellen als Alternative zu Forschungsreaktoren untersucht, wobei die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse; Baukonzepte und Anwendungen anhand einer bestehenden Anlage (ISIS Oxford) dargestellt werden. Es werden Vor- und Nachteile dieser Anlagen im Vergleich zu bestehenden Reaktoren diskutiert.

Spallationsquellen sind demnach Reaktoren im Hinblick auf Sicherheit, Entsorgung, Verfügbarkeit überlegen und bieten darüberhinaus den Experimentatoren einige Arbeitsmöglichkeiten (Myonen, Pionen, gepulster Strahl,...), die sich mit Reaktoren nur schwer oder überhaupt nicht realisieren lassen.

Der Arbeitskreis spricht daher folgende Empfehlungen aus:

1. Der Bedarf an Neutronen ist durch Spallationquellen zu decken.
2. Im Falle einer im nationalen Rahmen betriebenen deutschen Neutronenquelle sind angesichts der Wiedervereinigung die neuen Bundesländer als Standorte für eine Spallationsquelle ins Auge zu fassen. Einer europäischen Lösung ist der Vorzug zu geben.
3. Ein Betrieb im Rahmen einer Hochschule müßte als Voraussetzung eine umfassende Reform der dortigen Administration im Hinblick auf Effizienz haben. Die Form einer selbstständigen Großforschungseinrichtung erscheint verwaltungstechnisch sinnvoller.
4. Angesichts der ökologischen Risiken und des finanziellen Umfangs von Großprojekten ist ein öffentlicher Diskurs in einem größeren Rahmen als bisher über Neutronenquellen für die Forschung zu führen.



## Einführung

Diese Denkschrift soll den öffentlichen Diskurs über den geplanten Forschungsreaktor FRM II der TUM in Garching bei München um einige bisher zu kurz gekommene Aspekte erweitern. An ihrer Erstellung haben ausschließlich Naturwissenschaftler mitgewirkt, insbesondere Physiker des Physik-Departments der Technischen Universität München/Garching sowie Biologen und Chemiker.

Die vorliegende Arbeit umfaßt folgende Themenbereiche: Der wissenschaftliche Nutzen von und Bedarf an neuen Neutronenquellen wird unterstrichen, jedoch der Reaktor als Quelle von Neutronen angesichts der Vorzüge von Spallationquellen in Frage gestellt. Dazu werden die Konzepte für Forschungsreaktoren den Konzepten für Spallationsquellen gegenübergestellt und anhand bestehender Anlagen und der dort gewonnenen Betriebserfahrungen bewertet.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Standortfrage, die insbesondere durch die veränderten Bedingungen, die die deutsche Wiedervereinigung mit sich gebracht hat, neu zu diskutieren ist. Dazu soll diese Arbeit einen zusätzlichen Anstoß liefern. Darüberhinaus wird der Betrieb im Rahmen einer Hochschule angesprochen. Es ist zu befürchten, daß ein Bau der geplanten Großforschungseinrichtung auf Kosten der Vielfalt in Forschung und Lehre geht. Dieser Aspekt ist jedoch nicht von der Standortfrage zu trennen.

Leider mußte auf eine eingehendere Behandlung von Sicherheitsaspekten verzichtet werden, da der Sicherheitsbericht erst Ende 1991 zu erwarten ist.

Die behandelten Themenbereiche sind überaus komplex. Daher ist es unvermeidlich, daß grundsätzliche Aspekte, die eine ausführliche Diskussion erfordern würden, nur angeschnitten werden. Es können aber die hier interessierenden Sachverhalte meist nur kurz skizziert werden. Auch soll die Arbeit für interessierte Nicht-Physiker noch lesbar sein, so daß auf tiefeschürfende Fachdiskussionen verzichtet wird. Dieser Zielsetzung wird auch in der angefügten Literaturliste Rechnung getragen, die fast ausschließlich für Laien relativ leicht erhältliche Literatur enthält, sowie durch ein Glossar, in dem auftretende Fachbegriffe und Abkürzungen (hoffentlich) einfach erklärt werden. Anders ist eine demokratische Diskussion der behandelten Sachverhalte kaum möglich.

Wir hoffen, durch diese Arbeit einen Beitrag zu einer konstruktiven Diskussion über Forschungsreaktoren zu leisten und sind jederzeit dankbar für Anregungen und sachlich vorgetragene Kritik.

## 1. Reaktoren als Neutronenquellen und ihr Einsatz in der Forschung

### 1.1. Bedarf an Neutronenquellen für die Forschung

Der Bedarf an Neutronenquellen ist sowohl für die Grundlagenforschung, als auch für anwendungsorientierte Forschung unbestritten, wenn sich auch von Fall zu Fall die Frage stellt, ob man denn nicht mit einfacheren/billigeren Methoden zu gleichwertigen Ergebnissen gelangen könnte. Der folgende Abschnitt stellt einen kurzen Abriß der Anwendungen von Neutronenquellen dar.

Die meisten an Neutronenquellen erlangten Resultate sind der Festkörperphysik, der Materialforschung, der Chemie, der Biologie und der Medizin zuzuordnen, und nur ein geringer Teil davon fällt in die Kern- und Elementarteilchenphysik. Mit Neutronenquellen und ihren Experimentiereinrichtungen wird eine Vielzahl von Forschungsarbeiten durchgeführt, die Aufschluß über die Struktur, die Morphologie oder das Gefüge von Metallen, Legierungen, Halbleitern, Gläsern, Kunststoffen, Flüssigkeiten etc. sowie über die Bewegung von Atomen oder Molekülen dieser Stoffklassen geben. Darüberhinaus können auch Informationen über die Struktur und Dynamik von Molekülen in biologischen Systemen gewonnen werden [nach 6]. Ansonsten werden vergleichsweise selten für die Kern- und Elementarteilchenphysik grundlegende Experimente durchgeführt, etwa die genaue Messung der Neutronenlebensdauer [12]. Hier nun eine kurze Liste einiger aktueller Forschungsthemen:

Struktur und Dynamik von Hochtemperatursupraleitern

Polymer- und Kolloidphysik

Struktur und Dynamik in lebenden Zellen

Strukturbestimmung an Proteinaggregaten und Viren (z.B. HIV II)

Zerstörungsfreie Untersuchung der Spannungszustände von Werkstücken

Spurenanalytik mit Neutronenaktivierungsanalyse (Umweltschutz!!)

Spezielle Dotierungsverfahren für die Halbleiterelektronik

Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß es für praktisch jedes Verfahren Alternativen gibt. (z.B. Synchrotronstrahlung, NMR, ...). Dennoch bieten Neutronenexperimente in vielen Fällen für den einzelnen Experimentator den etabliertesten und direktesten Zugang zu den untersuchten Systemen.



## 1.2. Der Münchener Reaktor und seine Bedeutung für die Neutronenphysik

In diesem Abschnitt sollen einige für die Neutronenphysik relevante Aspekte im Zusammenhang mit dem alten Reaktor FRM behandelt werden. Es würde den Rahmen einer derartigen Schrift sprengen, wenn hier Grundlagen der Reaktorphysik behandelt würden. Der interessierte Leser sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [2, 8, 9, 10, populär: 15, 16].

Der alte Münchener Reaktor FRM wurde 1957 in Betrieb genommen und ist damit der älteste Reaktor auf deutschem Boden. In den darauf folgenden Jahren wurden dort Spitzenleistungen in der Neutronenphysik vollbracht, von denen die Entwicklung von Neutronenleitern und der Rückstreuungsmethode besonders hervorzuheben sind. Darüberhinaus wurde u.a. Pionierarbeit mit sogenannten "ultrakalten Neutronen" (das sind sehr langsame Neutronen für spezielle Anwendungen) geleistet.

Der Reaktor ist ein "Schwimmbadreaktor", d.h. der Reaktor hängt an einer Gitterkonstruktion unter Wasser in einem offenen Reaktorbecken. Er wird mit auf ca. 90% angereichertem Uran betrieben; die thermische Leistung beträgt 4 Mega Watt. Der Reaktorkern ist aus 23 Brennelementen mit insgesamt 3,5 kg U235 aufgebaut, von denen sieben Kanäle für neutronenabsorbierende Trimmstäbe enthalten [17].

Doch seit Mitte der 70er Jahre genügte der Reaktor wegen seines geringen Neutronenflusses von ca.  $\Phi = 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  nicht mehr Bedürfnissen der Neutronenphysiker. Daher wurden seit der Inbetriebnahme des Grenobler Hochflußreaktors 1971 die meisten Experimente mit hohen Flüssen dort durchgeführt. In Deutschland existieren zur Zeit insgesamt fünf Forschungsreaktoren [6]: (Zum Vergleich ist der deutsch-franz. Reaktor in Grenoble mit aufgeführt.)

Reaktor	Standort	Inbetriebnahme	Leistung	therm. Neutronenfluß
BER II	Berlin	1991	10 MW	$1,5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
FMRB	Braunschweig	1967	1 MW	$10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
FRG	Geesthacht	1962	5 MW	$5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
FRJ-2	Jülich	1963	23 MW	$10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
FRM	München	1957	4 MW	$5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
ILL	Grenoble	1971	57 MW	$1,2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Der Münchener Reaktor hat sich im Gegensatz zum Jülicher FRJ-2 als recht betriebssicher und zuverlässig erwiesen. Der Grenobler Reaktor ist dann, wenn er läuft, relativ zuverlässig, hat aber mitunter auch längere, nicht eingeplante Stillstandszeiten, so z.B. 1990, als man anlässlich einer Nachkalibrierung feststellte, daß der Reaktor 19 Jahre lang mit ca. 8% überhöhter Leistung betrieben wurde. Zur Zeit liegt der Reaktor wegen umfangreichen technischen Ausfällen für 1-2 Jahre still.

## 2. Zur Konzeption des geplanten Reaktors

Nach der Stilllegung dreier Reaktoren (FRJ-1 in Jülich, FR-2 in Karlsruhe und dem Reaktor der GSF/München) und in Anbetracht der Überalterung des FRM und der übrigen Reaktoren wurden Ende der 70er Jahre Überlegungen für eine moderne nationale Neutronenquelle angestellt. Das in die Zukunft weisende, aber überdimensionierte Projekt einer Spallationsneutronenquelle (SNQ) in Jülich wurde fallengelassen und stattdessen ein neuer Reaktor in München (FRM II) projektiert. Von deutschen Neutronenphysikern wird oft die Meinung vertreten, daß eine auf europäischer Ebene betriebene große Quelle keinen ausreichenden Ersatz für die in Deutschland wegfallenden Reaktoren darstellen würde, da nur eine nationale Quelle die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Neutronenforschung an internationalen Quellen sicherstellen könne [6].

### 2.1. Auslegungs- und Sicherheitsaspekte

#### 2.1.1. Auslegung

Der neue Münchener Reaktor [z.B. nach 5] soll eine hocheffiziente Neutronenquelle mit hohem thermischen Neutronenfluß bei geringer Reaktorleistung darstellen. Er ist in erster Linie optimiert für Strahlrohranwendungen. Es handelt sich um einen sehr kleinvolumigen, (leicht-)wassergekühlten Reaktorkern ("Kompaktkern") im Zentrum eines Schwerwassermoderatortanks in einem Leichtwasser-Reaktorbecken.

Die thermische Leistung beträgt ca. 20 Mega Watt bei einem Neutronenfluß von  $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Als Brennstoff soll Uransilicid-Dispersionsbrennstoff  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{Al}$  mit hoher Urandichte und hoher Anreicherung von U235 (93%) verwendet werden (insgesamt ca. 7,5 kg Uran). Die Länge des Reaktorzyklus beträgt ca. 45 Tage bei ca. 5 Zyklen pro Jahr. Die Reaktorregelung erfolgt mittels eines Absorberstabes aus Hafnium, der im Innenrohr des Kernes beweglich gelagert ist und mit einem ebenfalls beweglichen Beryllium-Innenreflektor verbunden ist. Dazu kommen noch 5 Schnellabschaltstäbe. Die Primärkühlung erfolgt durch  $\text{H}_2\text{O}$ , das Notkühlssystem ist dreifach ausgelegt und batteriegepuffert. Der Sekundärkreislauf ist über



Wärmetauscher an den Primärkreis und an die Kreisläufe für das Reaktorbecken und die Experimentiereinrichtungen gekoppelt. Das Notkühlsystem hat einen separaten Sekundärkreislauf.

Der alte Reaktor soll kurz vor der Inbetriebnahme des neuen stillgelegt, sein Gebäude allerdings weiterhin für Experimente genutzt werden. Der Kernbrennstoff soll aus den USA importiert und nach dem Abbrand dort wieder aufbereitet werden. Über die Verwendung der dort aufbereiteten Abfälle liegen keine Daten vor. Weitergehende Entsorgungskonzepte sind nicht projektiert. Über die Art des Transportes werden keine detaillierte Angaben gemacht. Es liegen keine Daten über Transport-Unfallversicherungen\*) vor. Für den Fall von Lieferschwierigkeiten durch die amerikanischen Hersteller wurden offiziell keine Alternativen ausgearbeitet. Die Vorlage des Sicherheitsberichtes wurde zweimal verschoben. Der neue Termin für die Veröffentlichung liegt bei Ende 1991.

### 2.1.2. Technische Sicherheit

Der nun projektierte Reaktor ist weder hinsichtlich seiner Bauweise, noch hinsichtlich seiner Betriebsweise mit dem alten FRM I vergleichbar. Es ist daher zu fragen, ob das neue Konzept nicht unter dem Sicherheitsaspekt einen wesentlichen Rückschritt gegenüber dem relativ einfachen Konzept des FRM I darstellt.

Denn es bestehen Zweifel, ob der geplante Reaktor insbesondere im Hinblick auf das inverse Flußfallenprinzip\*\*) überhaupt inhärent sicher ist. Die Verwendung von schwerem Wasser als Moderator (Erzeugung von Tritium!), sowie der Einbau einer kalten Quelle mit flüssigem D<sub>2</sub> sind aus sicherheitstechnischer Sicht bedenklich. Darüberhinaus ist nach der Sicherung vor Unfällen beim Transport der Brennelemente, bei Flugzeugabstürzen und bei terroristischen Anschlägen zu fragen. Da allerdings die Vorlage des Sicherheitsberichts nun schon zum zweiten Mal verschoben werden mußte, soll dieser Aspekt hier nicht vertieft werden, um keine vorschnellen Urteile zu fällen.

\*) Es gibt Hinweise darauf, daß einige Versicherungsgesellschaften nicht mehr bereit sind, den Überseetransport von Brennelementen zu versichern, weil im Falle eines Unfalls die Schäden an Mensch und Natur über jedes versicherungsfähige Ausmaß hinausgehen würden.

\*\*) Man bezeichnet den Aufbau eines Reaktors als "Inverses oder äußeres Flußfallenkonzept", wenn das Maximum des (thermischen) Neutronenflusses nicht im Innerem des Reaktorkernes, sondern wie beim FRM II etwas außerhalb davon liegt. Damit läßt sich ein hoher Neutronenfluß bei gleichzeitig niedriger Reaktorleistung erzielen.

### 2.1.3. Geplante Anwendungen

Insgesamt sollen etwa 12 Meßplätze in der Reaktorhalle eingerichtet werden. Die Anwendungsgebiete erstrecken sich auf Spektroskopie mit langsamen Neutronen, Diffraktometrie, kernphysikalische Probleme, ultrakalte Neutronen und eine Plattform für medizinische Versuche [4].

Es ist auch geplant, verschiedene Serviceleistungen wie Aktivierung und Siliziumdotierung für die Industrie anzubieten [3]. Bei dieser sog. "Transmutationsdotierung" erhält man besonders homogene Halbleiter. Jedoch ist die großtechnische Herstellung von Bauelementen mit Reaktoren nach Aussagen von Halbleiterphysikern nicht sehr sinnvoll. Es ist zudem zu vermuten, daß auf diese Weise dotierte Halbleiter für zivile Anwendungen nicht wirtschaftlich herstellbar sind, falls die vom Staat erbrachten finanziellen Vorleistungen auf die Produktionskosten angerechnet werden.

### 2.2. Der Betrieb im Rahmen der TUM

Der projektierte Reaktor soll von einer Hochschule (TUM) betrieben werden. Dafür kann eigentlich nur der Ausbildungsbetrieb, d.h. die Integration von Forschung und Lehre, sprechen, der durch einen derart großen Reaktor nicht unbedeutend beeinflusst würde. Im folgenden wird daher dieser Aspekt behandelt.

Im Anschluß daran wird die Frage erörtert, ob der Standort München überhaupt unter forschungspolitischen Gesichtspunkten sinnvoll ist und ob die TUM nicht durch den Betrieb einer überregionalen Anlage administrativ überfordert ist.

#### 2.2.1. Der neue Reaktor und die Lehre

##### a. Ausbildung von Spezialisten

Die Antragsteller weisen ausdrücklich darauf hin (in [3] unter "wirtschaftspolit. Aspekte"), daß *"neben ... unmittelbaren Vorteilen für einzelne Industriefirmen auch ein langfristiger Nutzen für die Kerntechnik"* gesehen werden müsse. *"Aus der Entwicklung der Klimabeeinflussung durch den Menschen kann für die Zukunft eine größere als die augenblickliche Bedeutung der Kernenergie abgeleitet werden... Besonders die Entwicklung der speziellen Experimentiereinrichtungen in unmittelbarer Nähe des Reaktorkerns, die in enger Wechselwirkung zwischen Auftraggebern (Forschung/Hochschule) und Auftragnehmern (Industrie) erfolgen muß, kann zur Erhaltung eines technischen Spezialwissens beitragen."*

Das bedeutet, daß der neue Reaktor nicht etwa nur für Anwendungen in der Neutronenphysik konzipiert ist, sondern auch Spezialisten ausgebildet werden sollen,



damit ein weiterer Ausbau der Kernenergie zur Verhinderung des Treibhauseffektes möglich ist.

Es ist in der Fachwelt durchaus umstritten, ob die Kernenergie tatsächlich ein probates Mittel gegen die Erwärmung der Erdatmosphäre ist, oder ob sie nicht im Gegenteil u.a. durch Begünstigung energieverschwendender Wirtschaftsweisen gerade die Erwärmung begünstigt. Einige Wissenschaftler sprechen wegen des von Reaktoren freigesetzten Krypton 85 sogar von einem nuklearspezifischen Treibhauseffekt [23,24]. Unabhängig davon, welche Haltung man zu dieser Frage einnimmt, ist doch ein "Ausbildungskernkraftwerk" zumindest als überaus fragwürdig anzusehen. Es kann nicht Aufgabe einer von der Allgemeinheit (Steuern!) finanzierten Universität sein, für einige wenige potentielle Arbeitgeber innerhalb eines derart schmalen Anwendungsbereichs Fachpersonal zu trainieren. Das ist Aufgabe der Industrie selbst. Man stelle sich vor, jede Branche mit vergleichbarer Beschäftigtenzahl würde diesen "Service" in Anspruch nehmen - die Universitäten degenerierten zu Ausbildungswerkstätten, ihr universitärer Bildungsanspruch wäre verloren.

#### **b. Zur allgemeinen Ausbildung**

Studenten der TUM im Fach Physik haben gewöhnlich abgesehen von wenigen Praktikumsversuchen keine Berührung mit dem bestehenden Reaktor. Für die angesprochenen Versuche ist ein Reaktor nicht unbedingt nötig, da es sich nur um Experimente mit schwachem Fluß handelt, die auch mit einer Radium-Beryllium-Quelle durchgeführt werden könnten. An diesem Zustand würde sich auch bei einem Reaktorneubau nicht viel ändern, da dieser ja gemäß den Angaben der Antragsteller wegen des "Neutronennotstandes" wohl derart ausgelastet wäre, daß kaum Strahlzeit für Praktikumsversuche zur Verfügung gestellt werden könnte.

Was die Ausbildung von Diplomanden und Doktoranden anbetrifft, kann festgestellt werden, daß dafür kein Reaktorbetrieb im Rahmen einer Hochschule notwendig ist. Oft wird angeführt, daß so die Forschung von der Lehre getrennt würde. Eine Trennung von Forschung und Lehre wird vom Arbeitskreis uneingeschränkt abgelehnt, aber Lehre ist kein Privileg von Hochschulen! Gerade der "Tourismus" zwischen den verschiedenen Forschungsrichtungen, der z.B. unter Elementarteilchenphysikern und ihren Diplomanden/Doktoranden überaus horizontweiternd wirkt, ist ein Beispiel dafür, daß die Ausbildung von Diplomanden/Doktoranden auch über hochschulferne, zentrale Forschungsanlagen wie dem CERN/Genf gut funktioniert. Kurz: eine Ausbildung von Diplomanden und Doktoranden an hochschulfernen Einrichtungen wird schon sehr lange durchgeführt und bringt sogar Vorteile für die Ausbildung mit sich.

Es bleibt zu untersuchen, welche Auswirkungen eine Großforschungseinrichtung wie der geplante Reaktor auf die Ausbildung an einer Hochschule (TUM) hätte. Es ist zu erwarten, daß sich die administrative Überlastung der mit dem Reaktor befaßten Lehrstühle weiter steigern wird. Schon heute liegen dort die durchschnittlichen Promotionszeiten etwa doppelt so hoch wie an den übrigen Instituten der TUM (typ. 6 zu typ. 3 Jahren). Darüberhinaus ist zu befürchten, daß eine Großforschungseinrichtung an einer Universität dazu führt, daß kleine und mittlere Projekte in anderen Forschungszweigen mit dem Hinweis auf die bestehende Großanlage ("Die TUM hat schon genug!") nicht zum Zuge kommen. Man wird sich dann auch bei künftigen Berufungen sehr an der Neutronenphysik orientieren, was langfristig die Lehre in ihrer Vielfalt beschneiden kann.

Zusammenfassend kann man sagen, daß der Betrieb einer überregionalen Großforschungsanlage an einer Universität eher mit Nachteilen als mit Vorteilen für die Lehre verbunden ist.

#### **2.2.2. Das Forschungsumfeld des geplanten Reaktorstandortes**

In Abschnitt 1.1. wurden die wesentlichen Anwendungsgebiete für Neutronen aufgeführt. Ist München für diese Forschungsbereiche überhaupt repräsentativ oder werden diese nicht andernorts viel intensiver bearbeitet?

Neutronen werden, wie in 1.1. ausgeführt, vorwiegend in den Materialwissenschaften für Strukturuntersuchungen benutzt. Die Zentren für diese Forschungszweige sind für Bayern in Augsburg und Bayreuth. So werden in Bayreuth an der Universität und am BIMF (Bayreuther Institut für Makromolekülforschung) in großem Umfang Polymerphysik und -chemie betrieben, wozu dort ein Sonderforschungsbe- reich (SFB 213) eingerichtet wurde. Darüberhinaus befindet sich dort ein Institut für Materialforschung. In Augsburg beschäftigt man sich v.a. mit anorganischen Materialien, etwa Keramiken, metallischen Legierungen und Faserverbundwerkstoffen. Für beide Forschungsstandorte wären Neutronen von Bedeutung.

In München wird Werkstoffforschung an der TUM mit Ausrichtung auf ingenieurwissenschaftliche Probleme der Materialanwender betrieben, wobei es praktisch kaum Überschneidungen mit den oben aufgeführten Forschungsfeldern gibt. Dagegen gibt es hier Spitzenforschung auf den Gebieten Oberflächen-, Halbleiter-, Bio-, Tieftemperatur-, Astro-, Plasma-, und Elementarteilchenphysik, sowie Biochemie, Ingenieurwissenschaften u.v.a. mehr. Für diese sind Neutronen meist nur von marginalem Interesse.



Da der alte Reaktor zu geringe Neutronenflüsse liefert, wurden schon vor einigen Jahren nahezu alle wesentlichen Arbeitsfelder der Münchener Neutronenphysik an andere Standorte (v.a. Grenoble) verlagert. Lediglich am Institut für Reaktorphysik E21 und vereinzelt an anderen Instituten des Physik-Departments der TUM wurde weiter in geringem Umfang am Garching Reaktor gearbeitet.

In München wird also zur Zeit nur wenig Forschung betrieben, die auf eine Neutronenquelle "vor der Haustür" tatsächlich angewiesen ist. Dagegen gibt es eine Reihe anderer Standorte, für die eine Neutronenquelle sinnvoller wäre. Geht man über Bayern hinaus, so wäre zu überlegen, ob nicht auch die neuen Länder als Standort für derart große Forschungsanlagen in Frage kämen. Denn gerade dort würden solche Einrichtungen nicht nur die Forschung aufwerten, sondern auch einen nicht zu unterschätzenden psychologischen Effekt für die Bevölkerung mit sich bringen. Wir weisen ausdrücklich darauf hin, daß das in gar keinem Fall als "St. Florians-Argument" mißverstanden werden darf. Im Vorgriff auf unsere weiteren Ausführungen zu Spallationsquellen sei hier nur gesagt, daß wir nicht für eine Verschiebung des Reaktors nach Osten, sondern für ein völlig anderes Konzept (Spallation) eintreten, das ökologisch nicht derart bedenklich ist wie ein Reaktor. Und als Standort für eine Spallationsquelle schlagen wir strukturschwache Regionen in ganz Europa vor, von denen sich im Falle der Bundesrepublik Deutschland die neuen Länder besonders anbieten würden.

### 2.2.3. Administrative Probleme

Die verwaltungstechnische Bewältigung einer Großforschungseinrichtung stellt gerade Universitäten vor große Probleme, da dies nicht zu den "normalen" Aufgaben einer Hochschulverwaltung gehört und ihr wesensfremd ist. Die dort vorhandene Lehrstuhlstruktur ist für relativ kleine und flexible Institute vorgesehen, die sich rasch auf neue Fragestellungen einstellen können, wohingegen für große Anlagen ein professionelles Management unumgänglich ist. Es ist zu befürchten, daß diese Arbeit letztlich an schlecht bezahlten Doktoranden hängen bleiben würde, wie das ja sonst gerade an Universitäten (und nicht nur dort) allzu oft praktiziert wird. So wäre eine ausreichende Betreuung der Gäste kaum sicherzustellen und Probleme im administrativen Betrieb wären eher die Regel als die Ausnahme. Abgesehen davon würde sich durch die zu erwartende administrative Überlastung der Lehrstühle die Qualität der Ausbildung und die Betreuung von Diplomanden und Doktoranden verschlechtern.

### 2.3. Sicherheitsaspekte des Standortes München

Der Sicherheitsbereich (Radius 10km) um den Reaktor umfaßt den gesamten Münchener Norden, in dem einige hunderttausend Menschen leben. Der Reaktor selbst liegt im Weichbild der Stadt Garching. Einige weitreichende regionalpolitische Entscheidungen stehen im Widerspruch zu diesem Reaktorstandort. So soll der Raum zwischen München-Nord und Freising industriell entwickelt und die TUM weitgehend aus der Münchener Innenstadt nach Garching verlegt werden. Im Falle eines größeren Unfalls wären die Folgen für die Universitätsangehörigen, für die Bürger von Garching und der umliegenden Gemeinden, sowie für die Einwohner Münchens unabsehbar.

Nahe (ca. 5 km) am Reaktor führen Flugrouten des Verkehrsflughafens München II vorbei, bei dem durch seinen Lage im Erdinger Moos häufig mit starker Nebelbildung zu rechnen ist. Dazu kommt noch zur Zeit reger militärischer Flugbetrieb. Nicht selten benutzen Kampfflugzeuge entgegen einschlägigen Verboten das "Atomei" als Wendemarke. Es wurden schon französische Mirage, Tornados der Bundesluftwaffe oder amerikanische F16 im Tiefflug über dem oder nahe beim Reaktor beobachtet.\*)

Die Gefahr bei Flugzeugabstürzen liegt dabei nicht nur in den unmittelbaren Einwirkungen auf den Reaktor selbst, sondern auch darin, daß vor Abtransport der abgebrannten Brennelemente dort größere Mengen verschiedenster hochradioaktiver Abfälle gelagert werden.

Angesichts dieser Sachverhalte muß man zu dem Ergebnis kommen, daß der Standort München/Garching für einen Reaktor sehr bedenklich ist.

\*) Ab 1992 liegt der Reaktor innerhalb der Kontrollzone des neuen Münchener Großflughafens. Der militärische Flugbetrieb unterläge dann strengeren Kontrollen als bisher.



### 3. Spallationsquellen als Alternative zu Forschungsreaktoren

#### 3.1. Konzepte für Spallationsquellen

In diesem Abschnitt wird die Spallation als Alternativkonzept zu Forschungsreaktoren vorgestellt und diskutiert. Natürlich kann und soll diese Einführung nicht die Lektüre einschlägiger Fachliteratur ersetzen, dennoch werden die wesentlichen Gesichtspunkte dieser Technik und der ihr zugrundeliegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten für eine Beurteilung dieses Konzepts (hoffentlich) ausreichend dargestellt.

##### 3.1.1. Der Spallationsprozeß und seine Anwendung bei Neutronenquellen

Im Gegensatz zur Kernspaltung, bei der aus einem Atomkern z.B. durch Beschuß mit einem Neutron neben einigen kleinen (weitere Neutronen) zwei große Bruchstücke (Kerne) entstehen, handelt es sich bei der Spallation um die Zertrümmerung eines Atomkernes in eine Vielzahl von einzelnen, meist kleinen Teilchen durch den Beschuß mit hochenergetischen Projektilen (siehe Bild 1). Die Kernspaltung liefert die Grundlage zum Bau von Kernreaktoren, die Spallation hingegen ermöglicht es, einzelne Teilchen in großen Mengen etwa für die Elementarteilchenphysik herzustellen. So beschießt man oft Schwermetallplatten (sog. Targets) mit leicht zu erzeugenden Protonen, und "fischt" sich mittels magnetischer Felder aus dem erzeugten Teilchenschauer die gewünschten heraus, um diese dann z.B. weiterzubeschleunigen (z.B. Antiprotonen am CERN) oder im Fall von Neutronen über Neutronenleiter und Moderatoren den Experimentiereinrichtungen zuzuführen.

Aus diesen physikalischen Prinzipien ergibt sich unmittelbar der Aufbau einer Spallationsneutronenquelle (siehe Bild 2): Man benötigt einen Beschleuniger, mit dem (meist) Protonen auf hohe Energie (etwa 1 GeV) beschleunigt werden. (Verglichen mit den in der Elementarteilchenphysik erreichten Energien (ca. TeV) ist das gering.) Diese Protonen werden auf das sog. "Spallationstarget" geführt, in dem der oben beschriebene Spallationsprozeß abläuft. Die entstandenen Neutronen werden in einem sog. "Moderator" abgebremst (Anm.: für Strukturuntersuchungen sind v.a. langsame Neutronen interessant.) und gelangen dann durch "Strahlrohre" zu den Experimentiereinrichtungen.

Falls erwünscht, kann man z.B. mit Hilfe von Magnetspulen geladene Teilchen (z.B. Pionen, Myonen) abziehen und für weitere, zusätzliche Experimente nutzen. Alle übrigen Teilchen werden in der Wandumhüllung gestoppt. Alle Komponenten der "Target-Region" (Target, Wandumhüllungen,...) werden dabei aktiviert (d.h. radioaktiv). Der Protonenbeschleuniger wird meistens gepulst betrieben, so daß ein starker gepulster Neutronenstrahl zur Verfügung steht.

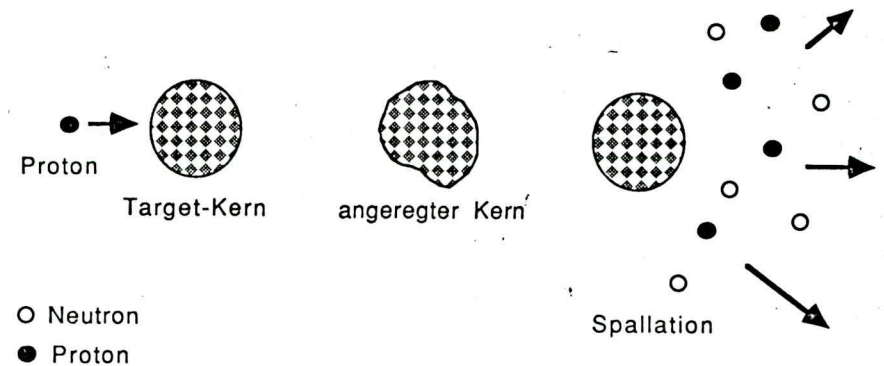


Bild 1: Der Spallationsprozeß

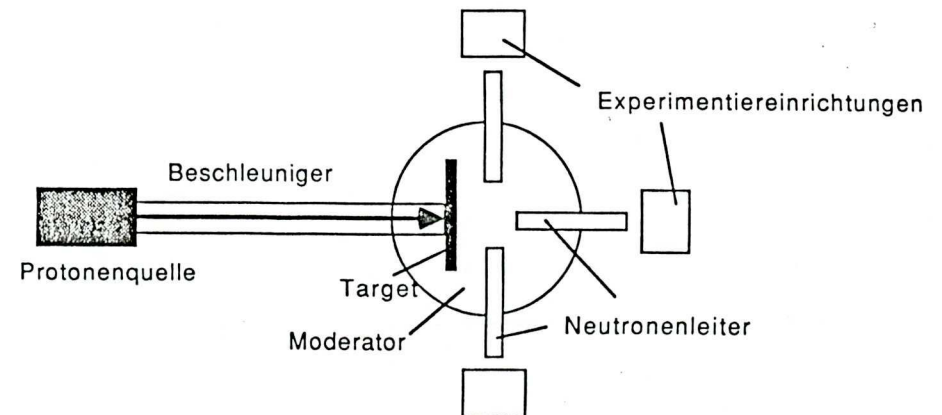


Bild 2: Schematischer Aufbau einer Spallationsquelle

### 3.1.2. Die Spallationsquelle ISIS

Als Beispiel für Spallationsquellen wird im folgenden die 1986 in Betrieb gegangene Quelle ISIS am Rutherford Appleton Laboratory in Oxford kurz beschrieben (siehe Bilder 3 und 4).

Die Protonen werden mit einem Synchrotron auf ca. 800 MeV beschleunigt, bevor sie auf ein Uran-Target geschossen werden. Der Protonenstrom beträgt 12 mA, was einem Fluß in der Größenordnung mittlerer Reaktoren liefert (etwa wie Jülich). Die Verfügbarkeit lag 1990 bei 78% mit steigender Tendenz, wobei der Strombedarf etwa 8 Mega Watt beträgt (vergleiche: ein Kohlekraftwerksblock liefert typisch 500 Mega Watt). ISIS ist im Bereich der Spektroskopie bei höheren Energien und auch bei Pulverdiffraktometrie und Reflektometrie den deutschen Reaktoren überlegen und in den übrigen Bereichen in etwa gleichwertig mit dem Jülicher Reaktor [6]. An Experimentiereinrichtungen sind z.Z. (1991) einsatzbereit [19]: (Die folgende Übersicht ist nur für Fachleute interessant, daher wurde auf Erklärungen verzichtet.)

- HRPD High Resolution Powder Diffractometer
- MARI Multi Angle Rotor Instrument
- LAD Liquid & Amorphous Diffractometer
- HET High Energy Transfer Spectrometer
- TFXA Time-focused Crystal Analyzer Spectrometer
- IRIS Quasielastic and High Resolution Inelastic Spectrometer
- LOQ Low Q Diffractometer
- CRISP Critical Reflection Spectrometer
- PRISMA High Symmetry Coherent Inelastic Excitation Spectrometer
- SANDALS Small Angle Neutron Diffractometer for Amorphous and Liquid Samples
- POLARIS Polarized Neutron Spectrometer
- eVS Electron Volt Spectrometer
- SXD Single Crystal Diffractometer
- $\mu$ SR Myon Spectrometer

Weitere Einrichtungen sind in Vorbereitung bzw. werden geplant, wie z.B. ein weiteres Niederfrequenztarget für kalte Neutronen. Gemeinsam mit dem Institut für Chemie und Physik/Japan (RIKEN) werden Einrichtungen zur Myonenspektroskopie gebaut. ISIS gilt nach einigen kleinen Startschwierigkeiten und Kinderkrankheiten unter Neutronenforschern als sehr zuverlässige Quelle, auch wenn die Verfügbarkeit zur Zeit noch unter der von LANSCE in Los Alamos (etwa 90% 1990) liegt.

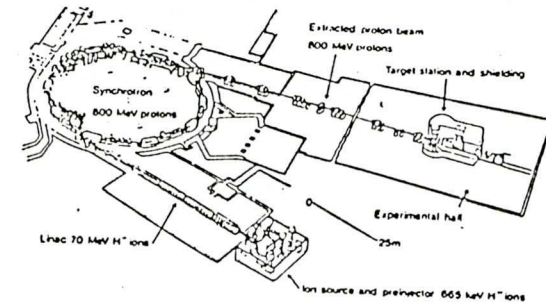
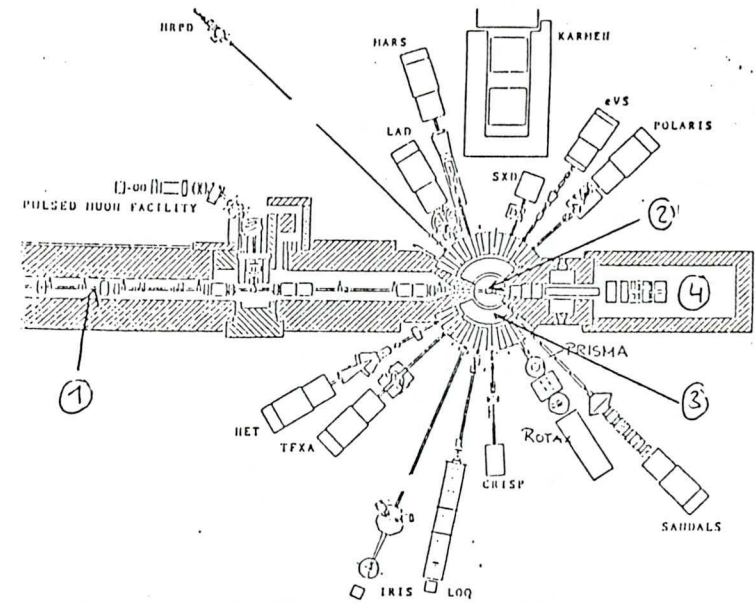


Bild 3: Die Spallationsquelle ISIS [14]



- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| 1 Proton Strahlführung | 2 Uran-Target          |
| 3 Moderator            | 4 Target-Wechselanlage |

Bild 4: Target-Station von ISIS. Die Experimentiereinrichtungen sind rings um das Target angeordnet [14].



### 3.1.3. Das Projekt einer Spallationsquelle in Jülich

Ende der 70er Jahre begann die Projektierung einer großen, im nationalen Rahmen betriebenen, deutschen Spallationsneutronenquelle SNQ in Jülich. Nach Ausarbeitung des Projekts bis zur Baureife, wurde dieses Vorhaben 1985 eingestellt [u.a. 22]. Dieses Projekt war technisch und physikalisch sehr gut durchdacht und erreichte inzwischen internationales Ansehen. Als Hauptgrund für das Scheitern wird der für ein nationales Projekt viel zu hohe Preis von 1,4 Mrd DM genannt. Mittlerweile werden jedoch Überlegungen angestellt, wie mit einem etwas bescheidenerem Konzept die Kosten erheblich gedrückt werden können.

Die SNQ war auf einen Fluß von  $1,2 \times 10^{15}$  (Mittel) und  $4,2 \times 10^{16}$  (Spitze) ausgelegt, was in etwa dem des Grenobler Hochflußreaktors entspricht. Dazu sind hohe Protonenströme notwendig (5...100mA), die sich z.Z. nur mit Linearbeschleunigern realisieren lassen, was die extreme Kostenexplosion zur Folge hatte. Beim Bau der Beschleuniger hätte man wegen der sehr hohen Strahlströme in vielen Bereichen technisches Neuland betreten. Ein etwas bescheideneres Konzept sieht einen kleinen Linearbeschleuniger in Kombination mit einem FFAG-Beschleuniger (s.u.) vor.

## 3.2. Vergleich von Spallationsquellen mit Reaktoren

### 3.2.1. Kosten

Spallationsquellen sind sowohl von den Baukosten her, als auch im Betrieb im allgemeinen teurer als Reaktoren. So beliefen sich die Projektkosten für die Jülicher Spallationsquelle auf ca. 1,4 Mrd DM (1988), die jährlichen Unterhaltskosten wurden mit ca. 30 Mio DM angegeben, wohingegen der Garching-Reaktor FRM II mit ca. 400 Mio DM (Stand 1988) \*) und 15 Mio DM Betriebskosten pro Jahr bei wesentlich geringerem Neutronenfluß projektiert wird [7]. In dieser Kostenrechnung sind die Kosten für Unterhalt, Brennelemente und Personal enthalten. Allerdings fehlen in den meisten Kostenanalysen für Reaktoren realistische Kalkulationen für den Abriß des Reaktors und die Beseitigung etwaiger Altlasten (angeblich etwa 10 Mio DM beim FRM I). Es ist nicht möglich zu sagen, wie viel der endgültige Abriß einer Reaktoranlage und die Entsorgung des dabei anfallenden radioaktiv verseuchten Schrotts tatsächlich kosten wird. Die bisherigen Konzepte gehen oft nur von einem Einschluß der Reaktoren aus. Auch ist die langfristige Entsorgung des Atom Mülls aus Reaktoren unter dem Gesichtspunkt der Folgekosten bis heute ein ungelöstes Problem.

\*) Inzwischen wird der Preis für den Münchener Reaktor auf etwa 800 Mio. DM geschätzt. Es ist zu erwarten, daß die Betriebskosten sich um den gleichen Faktor erhöhen.

So liegt bis heute kein Konzept vor, das eine Endlagerung der radioaktiven Abfälle im Hinblick auf die riesigen Zeiträume verantwortlich sicherstellen würde.

Bei der Kostenanalyse von Reaktoren wird auch meist nicht beachtet, daß Reaktoren oft eine geringere Verfügbarkeit als Spallationsquellen haben und die fehlende Zeitstruktur des Neutronenstrahls bei Reaktoren moderne zeitaufgelöste Experimente, wie sie bei heute aktuellen Fragestellungen häufig notwendig sind, erschwert und damit verteuert.

Darüberhinaus gibt es Projektstudien für Spallationsquellen, die statt eines großen LINACs (1,1 GeV Protonen im Falle Jülich) oder eines Synchrotrons (850 MeV Protonen bei ISIS) eine Kombination aus einem kleinen 200 MeV-LINAC und einem FFAG-Beschleuniger (siehe Glossar) vorsehen, was die Kosten für Bau und Betrieb erheblich senken könnte.

Daher ist es fraglich, ob langfristig gesehen Spallationsquellen tatsächlich signifikant teurer sind als Reaktoren. Darüberhinaus bieten Spallationsquellen dem Forscher im Vergleich zu Reaktoren viele neue Möglichkeiten ( $\mu$ SR,... siehe weiter unten), die auch unter dem Kostenaspekt eine Neubewertung anregen sollten.

Im Ganzen ist es sinnvoll, Großforschungseinrichtungen grundsätzlich gerade wegen der Kosten international zu betreiben. Es bietet sich an, anstelle von Reaktoren auf europäische Spallationsquellen zu setzen.

### 3.2.2. Energieverbrauch

Spallationsquellen benötigen für ihren Betrieb je nach Leistung der Beschleuniger eine Kraftwerksleistung von 5 bis 20 Mega Watt. (Vergleiche: ein Block eines typischen Kohlekraftwerkes hat eine Leistung von ca. 500 Mega Watt.) So liegt der Bedarf von ISIS bei 8 Mega Watt. Der Energiebedarf der SNQ in Jülich hätte aber wegen der dort projektierten extrem hohen Protonenstrahlströme ( $\Rightarrow$  Neutronenfluß in der Größenordnung des Grenobler Reaktors!) weit darüber gelegen.

Allerdings liegt der Energieverbrauch einer Spallationsquelle nicht über dem vergleichbar großer Einrichtungen, so daß es sich hier um eine allgemeine Problematik und nicht um ein Spezifikum von Spallationsquellen handelt. Darüberhinaus könnte der Energieverbrauch durch eine Kombination aus LINAC und FFAG (siehe oben) wegen des höheren Wirkungsgrades gesenkt werden.

Wir weisen darauf hin, daß auch Forschungsreaktoren Energie verbrauchen (z.B. für Kühlung, Reaktorsteuerung, ...), wobei der Verbrauch unter dem von Spallationsquellen liegt.



### 3.2.3. Anmerkungen zum Plutonium-Brüten mit Spallationsquellen

Findet bei einer Spallationsquelle Uran 238 als Targetmaterial Verwendung, so wird in diesem Target wie bei den Reaktoren Plutonium erbrütet. Die Menge an waffenfähigem Plutonium 239 ist wegen der hohen Neutronenflüsse und bei großen Targetlebensdauern gering. Dennoch ergeben sich in diesem Fall Sicherheitsprobleme, insbesondere was die Entsorgung und den Schutz vor Entwendung anbetrifft. Wird jedoch sichergestellt, daß als Targetmaterial statt Uran ein anderes Schwermetall, zum Beispiel Wismut, benutzt wird, entfällt dieses Problem vollständig. Darüberhinaus kann die Einhaltung diesbezüglicher Vorschriften kontinuierlich und technisch recht einfach (Gammaspektrum des Targets) überwacht werden. Bei Reaktoren mit hoher Anreicherung wie dem geplanten Münchener FRMII (aber nicht nur diesen) wird immer Plutonium erbrütet, wobei der Anteil an waffenfähigem Plutonium 239 am FRM II nicht sehr groß ist.

### 3.2.4. Sicherheitsaspekte

Spallationsquellen sind sicher. Konzeptionell kann es weder ein "Durchgehen" noch einen Austritt größerer Mengen an radioaktivem Material geben. Es gibt jahrzehntelange Erfahrung mit großen Beschleunigern und ihren Spallationstargets, etwa mit dem SPS am CERN/Genf, so daß es hinsichtlich der Sicherheitsproblematik keine wesentlichen Bedenken gibt.

Im Gegensatz dazu sind Forschungsreaktoren vergleichsweise unsicher. Zwar ist bei diesen das "Restrisiko" geringer als bei Leistungsreaktoren, aber ein "Durchgehen" des Reaktors mit einer damit verbundenen Freisetzung radioaktiver Spaltprodukte und einer u.U. auftretenden Kernschmelze kann nie ganz ausgeschlossen werden. Auch sind die Folgen von Katastrophen wie Erdbeben und Flugzeugabstürzen bei Reaktoren der im allgemeinen unabsehbar, bei Spallationsquellen vergleichsweise gering

### 3.2.5. Entsorgung

Die bei Spallationsquellen verwendeten Targets werden während des Betriebes hochgradig aktiviert (d.h. radioaktiv). Somit stellt die langfristige Entsorgung des Targets ein ernstzunehmendes Problem dar. Im Vergleich zu Reaktoren kann ein Spallationstarget aber bei gleichem radioaktivem Inventar (einige kg) bei höherem Neutronenfluß länger verwendet werden (je nach Bauausführung des Targets zwischen mehreren Monaten und einigen Jahren), so daß die Menge an radioaktiven Abfall unter der eines Reaktors liegt. Somit ist unter dem Gesichtspunkt der Entsorgungsproblematik eine Spallationsquelle in jedem Fall das

kleinere Übel. Auch ist die Menge an radioaktiv verseuchten Schrott beim Abriß eines Reaktors etwas höher, als bei Spallationsquellen.

### 3.2.6. Verfügbarkeit

Oft weisen Forschungsreaktoren eine recht bescheidene Verfügbarkeit gegenüber Beschleunigern auf. So stand z.B. der Hochflußreaktor in Grenoble wegen technischer Probleme 1990 mehr als 30% des Jahres still, weil man 19 Jahre nach Inbetriebnahme anläßlich einer Nachkalibrierung festgestellt hat, daß man den Reaktor wegen falsch geeichter Meßgeräte mit einer Leistung betrieben hatte, die ca. 8% über den Auslegungswerten lag [7]. Auch zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Denkschrift steht der Reaktor voraussichtlich für ein bis zwei Jahre still, weil umfangreiche Revisionsarbeiten durchgeführt werden müssen. Ebenso ist der Reaktor in Jülich unter Neutronenforschern wegen seiner unvorhersehbaren Ausfälle und langer Stillstandszeiten berüchtigt.

Der Reaktor in München FRM I ist dagegen relativ zuverlässig. Beim FRM II wird die Verfügbarkeit nicht zuletzt wegen der Verwandtschaft zum Grenobler Konzept vermutlich nicht wesentlich über diesem liegen.

Demgegenüber hat die Spallationsquelle ISIS in Oxford nach kleineren Startproblemen und Kinderkrankheiten gerade wegen ihrer hohen Zuverlässigkeit und damit hohen Verfügbarkeit einen guten Ruf [19]. Andere Spallationsquellen (z.B. LANSCE, USA) weisen ebenfalls hohe Verfügbarkeiten auf.

### 3.2.7. Eigenschaften im Experimentierbetrieb

Für den Neutronenforscher hat eine Spallationsquelle u.a. den Vorteil, daß die Beschleuniger meist im Pulsbetrieb arbeiten. Daher hat der Neutronenfluß eine Zeitstruktur, d.h. der Neutronenstrahl steht dem Experimentator in voller Stärke gepulst zur Verfügung, wohingegen man diese Zeitstruktur bei Reaktoren erst durch Strahl-Chopper realisieren muß, was die Strahlintensität sehr stark reduziert. Dadurch werden zeitaufgelöste Experimente bei Spallationsquellen oft vereinfacht (und damit auch billiger!). Für hohe Pulsfrequenzen sind aber auch bei Spallationsquellen Chopper nötig. Bei Nutzung kalter (langsamer) Neutronen verbreitern sich die Pulse etwas, dennoch ist die Nutzung derartiger Neutronen wie am Reaktor möglich (siehe geplante Einrichtung am ISIS nach [19]). Es werden allerdings auch Spallationsquellen mit kontinuierlichem Strahl geplant, etwa die Quelle SINQ am PSI/Zürich. Es soll jedoch nicht verschwiegen werden, daß bei der sog. "Kleinwinkelstreuung" der bei Spallationsquellen mögliche Fluß i.a. geringer als bei Reaktoren ist, die dabei erzielten experimentellen Resultate sind jedoch gleichwertig [13].



Darüberhinaus kann eine derartige Spallationsquelle auch für Experimente genutzt werden, die weit über die Neutronenphysik hinausgehen. So werden beim Spallationsprozeß nicht nur Neutronen erzeugt, sondern auch eine Vielzahl von Pionen, die wiederum in Myonen zerfallen. Die Pionen haben in der Mittelenergiephysik ein breites Anwendungsfeld. Myonen können z.B. in der Festkörperphysik u.a. zur Untersuchung von magnetischen Strukturen oder Hyperfeinwechselwirkungseffekten (Myon-Spin-Rotation  $\mu$ SR) herangezogen werden. Dem Experimentator steht z.B. an der Spallationsquelle ISIS eine  $\mu$ SR-Experimentiereinrichtung zur Verfügung [19], an der vom PSI projektierten Quelle ist ähnliches vorgesehen. Außerdem eröffnet sich einem das weite Feld exotischer (myonischer) Atome: So wird z.B. von einer Gruppe (E18) der TUM an der Myonenquelle des PSI (Paul-Scherrer-Institut, früher SIN) die myonkatalysierte Kernfusion erforscht [18].

### 3.2.8. "Politische" Betriebssicherheit

Durch einen Betrieb mit hochangereichertem Uran (beim FRM II ca. 93%) wird die Neutronenphysik in der Bundesrepublik Deutschland abhängig von der Qualität der handelspolitischen Beziehungen zu den USA. Es kann durchaus vorkommen, daß derartige Lieferungen weder an Qualität noch an Quantität für den Betrieb eines Reaktors ausreichen bzw. ganz ausbleiben. Man sollte sich fragen, ob man sich in solche Abhängigkeiten begeben will.

In den USA wird die Anreicherung von Forschungsreaktoren auf etwa 20% beschränkt. (Anm.: Derartig hoch angereichertes Uran ist u.U. waffenfähig) Der geplante Münchener Reaktor wäre dann einer der wenigen, die mit hoher Anreicherung (ca.93%) laufen würden. Aufgrund des Funktionsprinzips (inverse Flußfalle und Kompaktkern) wäre bei ihm eine Umstellung auf die in Amerika geforderten 20% nicht möglich.

Darüberhinaus ist zu fragen, ob es der Neutronenphysik dienlich ist, wenn sie sich über ihre Quellen derartig eng an politisch sehr umstrittene Technologien ankoppelt. Man denke nur an die Vorgänge um den Berliner Reaktor, dessen Inbetriebnahme sich sehr lange verzögerte, weil die langfristige Entsorgung nicht sichergestellt werden kann. Ein Regierungswechsel ermöglichte die Betriebsgenehmigung trotz erheblicher politischer Bedenken. Erst vor kurzem mußte das Kernkraftwerk in Mühlheim-Kärlich aufgrund eines Gerichtsurteils abgeschaltet werden. An die Vorgänge um die WAA in Wackersdorf sei nur am Rande erinnert.

Man kann somit feststellen, daß durch die Nutzung von Reaktoren statt Spallationsquellen die Neutronenphysik allzu eng an das politische Schicksal der Reaktortechnik gekoppelt wird. Unter Umständen könnte dann bereits ein Regierungswechsel das Ende der Neutronenphysik in Deutschland bedeuten. Es ist

nicht zu erwarten, daß rot-grüne Regierungen bei der Durchführung des angestrebten Ausstieges aus der Reaktortechnik dabei vorrangig die Belange der Neutronenphysik berücksichtigen würden. Gerade unter diesem Aspekt sollte sich die Neutronenphysik durch alternative Quellen vom Schicksal der Reaktortechnik unabhängig machen. Selbst ein Standort in Bayern böte keinerlei Gewähr, da die Landesregierungen gegenüber der Bundesregierung weisungsgebunden sind, und auch hier Regierungswechsel keineswegs ausgeschlossen sind.

### 3.3. Zusammenfassende Diskussion

Spallationsquellen sind, wie oben ausgeführt, Forschungsreaktoren unter den Gesichtspunkten Sicherheit, Abfallentsorgung und Verfügbarkeit überlegen. Ihr Betrieb ist aus ökologischer Sicht dem eines Reaktors vorzuziehen. Für den Experimentator ist die Zeitstruktur des Neutronenstrahls noch ein weiterer Vorteil, der sowohl für die konventionelle Neutronenforschung, als auch im Hinblick auf völlig neue Anwendungen und Experimente (z.B. Myonen) nicht zu unterschätzen ist.

Lediglich die höheren Kosten und der Energieverbrauch von Spallationsquellen sprechen gegen diese, wobei jedoch zu bedenken ist, daß es bisher keine echten Vergleichsrechnungen für Reaktoren und Spallationsquellen gibt, die den unterschiedlichen Qualitäten dieser beiden Systeme wirklich gerecht werden. Im übrigen sollten derartige Großprojekte nur in internationalem Rahmen durchgeführt werden. Dadurch würde sich auch die Kostenfrage entschärfen.

Die Tatsache, daß atomrechtliche Genehmigungen für Spallationsquellen erheblich einfacher handzuhaben sind als bei Kernreaktoren, sollte es der Neutronenphysik ermöglichen, die "unheilige Allianz" mit der Reaktortechnik aufzuheben.

Ein Spallationsprojekt würde wissenschaftlich und technisch in die Zukunft weisen. Es ist nicht einzusehen, warum man die 50 Jahre alte Reaktortechnik, deren Zukunft darüberhinaus höchst unsicher ist, einem Spallationsprojekt vorziehen sollte, das nicht nur für die Neutronenphysik, sondern auch für die Beschleunigertechnik (Elektronik, Hochfrequenztechnik, Computer,...) wesentliche Fortschritte mit sich bringen würde.

Die in dieser Schrift dargelegten Betrachtungen lassen nur einen Schluß zu: Es ist angesichts der Probleme, die beim Bau und Betrieb von Kernreaktoren auftreten, unsinnig, weiterhin auf diese als Neutronenquelle zu setzen. Hier sind Spallationsquellen Reaktoren in nahezu jeder Hinsicht überlegen.

#### 4. Zusammenfassung: Eine Spallationsquelle anstatt des FRM II?

Die bisherigen Ergebnisse des Abschnitts 3 gelten natürlich auch für den geplanten FRM II: Praktisch alle Experimente, die an diesem Reaktor geplant werden, lassen sich auch (wenn nicht sogar manchmal besser) an einer Spallationsquelle durchführen. Sämtliche mit Reaktoren verbundenen sicherheitstechnischen und ökologischen Probleme würden weitgehend entschärft.

Neben diesen eher technischen Überlegungen sprechen eine Reihe genereller Gründe gegen einen Betrieb einer Großforschungsanlage an Hochschulen wie der TUM, sowie gegen den Standort München: Wie in Abschnitt 2.2. festgestellt wurde, ist der Betrieb einer Großforschungseinrichtung (das gilt für Reaktoren und Spallationsquellen) im Rahmen einer Hochschule wie der TUM sehr kritisch einzuschätzen:

1. Für den Ausbildungsbetrieb sind echte Vorteile nicht erkennbar. Es drängt sich der Verdacht auf, daß der Reaktor nicht zuletzt deshalb an einer Hochschule betrieben werden soll, weil man hofft, die Akzeptanz der Kerntechnik unter Physikstudenten so erhöhen zu können, und damit den Nachwuchs für einen weiteren Ausbau der Kernenergie sicherzustellen. Das bedürfte aber erst einer öffentlichen Diskussion.
2. Es ist zu befürchten, daß die Hochschuladministration in ihrer heutigen Form durch den Betrieb einer Großforschungseinrichtung überfordert wäre.
3. Der Forschungsstandort München zeichnet sich durch eine in dieser Form nahezu einmalige Zusammenballung von Spitzenforschungseinrichtungen aus, wobei allerdings die Neutronenforschung hier keine herausragende Rolle spielt. Dagegen bieten im Hinblick auf die Neutronenphysik andere Standorte weitaus bessere Voraussetzungen

Es ist nicht zu verantworten, einen Reaktor mitten in einen Ballungsraum wie München nahe an einem Großflughafen zu errichten.

#### Wir sprechen daher folgende Empfehlungen aus:

1. Der Bedarf an Neutronen ist durch Spallationquellen zu decken.
2. Im Falle einer im nationalen Rahmen betriebenen deutschen Neutronenquelle sind angesichts der Wiedervereinigung die neuen Bundesländer als Standorte für eine Spallationsquelle ins Auge zu fassen. Einer europäischen Lösung ist der Vorzug zu geben.
3. Ein Betrieb im Rahmen einer Hochschule müßte als Voraussetzung eine umfassende Reform der dortigen Administration im Hinblick auf Effizienz haben. Die Form einer selbstständigen Großforschungseinrichtung erscheint verwaltungstechnisch sinnvoller.
4. Angesichts der ökologischen Risiken und des finanziellen Umfangs von Großprojekten ist ein öffentlicher Diskurs in einem größeren Rahmen als bisher über die Quellen der Neutronenforschung zu führen.

#### 5. Anhang

##### 5.1. Literaturnachweise

- [1] Böning, Gläser "Neue Forschungsreaktoren", Energie 38, 28-32 (1986)
- [2] Musiol 1988: Musiol, Ranft, Reif, Seeliger "Kern- und Elementarteilchenphysik" VCH Basel 1990
- [3] Exposé "Zur Bedeutung eines neuen Forschungsreaktors in Garching" Fakultät für Physik E21/TUM, 11.10.1989
- [4] "Der neue Forschungsreaktor der Technischen Universität München" Fakultät für Physik E21/TUM, Juni 1988
- [5] "Der neue Forschungsreaktor der TUM in Garching - Das Konzept in Stichworten", Fakultät für Physik E21/TUM, 18.1.1989
- [6] "Stellungnahme zur forschungspolitischen Notwendigkeit einer überregionalen Neutronenquelle. Geplanter Neubau eines Forschungsreaktors an der Technischen Universität München", Wissenschaftsrat, Berlin 12.5.1989
- [7] Der bayerische Staatsminister für Unterricht, Kultus, Wissenschaft und Kunst, "Stellungnahme betreffend der schriftlichen Anfragen des Abgeordneten Dr. Magerl betreffend den geplanten Neubau eines Forschungsreaktors der Technischen Universität München in Garching", Nr. E/2-3/35 533



- [8] J. Rassow "Risiken der Kernenergie", VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1988
- [9] Beckurts, Wirts "Neutron Physics", Springer 1964
- [10] Duderstadt, Hamilton "Nuclear Reactor Analysis", John-Wiley&Sons 1976
- [11] J.White, T.Springer "Neutronenphysikalische Experimente am Höchstfluß reaktor in Grenoble". Physikal. Blätter 35, 338 und 448 (1979)
- [12] D.Dubbers "Teilchenphysik mit langsamen Neutronen", Phys.Bl. 45, 133 (1989)
- [13] F.Carsughi, R.K.Heenan, F.Rustuchelli, M.Stephanon "Comparison between Small Angle Neutron Scattering Experiments Performed at a High Flux Reactor and at a Pulsed Neutron Source", ILL SANS-NR Workshop Handbook 25-27 March 1991
- [14] Bericht über das Arbeitstreffen der Verbünde "Neutronenstreuung zur Untersuchung kondensierter Materie" und "Neutronenstreuung und komplementäre Methoden in Chemie und Biologie" in Blaubeuren vom 28 Sept. bis 1.Okt. 1987
- [15] E.Lüscher "Kernenergie und Kerntechnik", Vieweg 1982
- [16] B.Brückner "dtv-Atlas zur Atomphysik"
- [17] "30 Jahre FRM", Fakultät für Physik/TUM 1987
- [18] S.E.Jones "Muon-catalysed fusion revisited", Nature 321, p127 (1986)
- [19] ISIS Information - Call for Proposals Spring 1991
- [20] Neutron News 1/1991
- [21] K.H.Speidel "Festkörperphysik mit Teilchenbeschleunigern Teil II" TUM Skriptum (E12)
- [22] T.Springer "Die ungewisse Zukunft der Forschung mit Neutronen" Phys.Bl. 47, 185 (1991)
- [23] U.Fritsche, S.Kohler "CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien: Atomkraft versus Effizienz", Öko-Institut 1990
- [24] R.Kollert "Krypton-85 - Risikofaktor für die Atmosphäre", Globus 9/89, S.294-297

## 5.2. Abkürzungen/Glossar

**Aktivierungsanalyse** Extrem genaues Verfahren zur Bestimmung der Zusammensetzung einer Probe durch Beschuß mit Neutronen oder anderen Teilchen. Die Atomkerne der Probe werden dabei radioaktiv ("aktiviert") und senden charakteristische  $\gamma$ -Strahlen aus.

**Beschleuniger** Maschine, in der Teilchen (meist Protonen oder Elektronen) mit elektrischen Feldern auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt werden. Bauformen: -> LINAC, FFAG, Synchrotron,...

**BMFT** Bundesministerium für Forschung und Technologie

**CERN** Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire - großes Zentrum für Elementarteilchenphysik in Genf, bekannt durch bahnbrechende Experimente auf diesem Gebiet

**Chopper** Strahlunterbrecher (rotierende Scheibe mit Spalt), der meist zur Erzeugung von Strahl-Pulsen und für Geschwindigkeitsfilter verwandt wird.

**DFG** Deutsche Forschungsgemeinschaft

**eV** Elektron Volt, Energieeinheit der Kern- und Elementarteilchenphysik,  $1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}$  Joule

**FFAG** (engl.: fixed field alternating gradient) spezielles Konzept für Ringbeschleuniger (relativ billig), siehe auch [2]

**Fluß** (eigentl. Flußdichte) Zahl der Teilchen (hier Neutronen), die pro Zeitintervall durch eine Einheitsfläche "fliegen" (fließen). Maß für die Menge der Neutronen, die eine Neutronenquelle liefert.

**Forschungsreaktor** (siehe Reaktor)

**FRM** Forschungsreaktor München

**FRM II** Forschungsreaktor München II (geplant)

**GeV** Giga Elektron Volt (1Mrd -> eV)

**GSF** Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung/München

**ILL** Institute Laue-Langevin, Name des dem Grenobler Reaktor zugeordneten Institutes

**ISIS** Spallationsquelle in Oxford

**LANSCE** Spallationsneutronenquelle in Los Alamos, USA

**LINAC** (engl.: Linear Accelerator) Linearbeschleuniger, siehe [2]

**LMU** Ludwigs-Maximilians-Universität München

**MeV** Mega Elektronen Volt (Energieeinheit der Kernphysik) -> eV

**Moderator** Material zur Abbremsung von Neutronen, meist (leichtes) Wasser

**MPI** Max-Planck-Institut

**Myon** ein Elementarteilchen, siehe [2]

**Neutron** ungeladener Baustein der Atomkerne Projektile bei Neutronenstreuexperimenten

**Neutronenfluß** Zahl der Neutronen, die pro Zeit durch eine Einheitsfläche "fliegen", Einheit: Neutronen/cm<sup>2</sup>s, -> Fluß Neutronenquelle u.a. Forschungsreaktor, -> Spallationsquelle

**NMR** engl. Nuclear-Magnetic-Resonance (Kernresonanz), eng mit der Computertomographie verwandtes Verfahren für Strukturuntersuchungen z.B. von Festkörpern oder Molekülaggregaten.

**μSR** Myon-Spin-Rotation Untersuchungsmethode der Festkörperphysik mit positiv geladenen - Myonen.

**Quelle** hier: Neutronenquelle, Gerät (Reaktor, Spallation) zur Erzeugung großer Mengen von Neutronen für experimentelle Einrichtungen

**Pion** Teilchen, das beim Spallationsprozeß mit erzeugt wird. Zerfällt u.a. in -> Myonen, angewandt in der Mittelenergiephysik

**Proton** geladener Baustein der Atomkerne, Projektil in -> Beschleunigern, Anwendung u.a. bei -> Spallation

**Radium-Beryllium-Quelle** Einfachste und billigste Neutronenquelle. Liefert nur relativ geringe Flüsse und ist daher nur für wenige Experimente sinnvoll.

**Reaktor** Großgerät, in dem eine Kettenreaktion von Kernspaltungen aufrecht erhalten wird. Optimiert für Energiegewinn (Kernkraftwerk) oder für große, extrahierbare Neutronenflüsse (Forschungsreaktor).

**Reaktorzyklus/periode** Zeit, die die Brennelemente im Reaktor sind, bevor sie gewechselt werden.

**SFB** Sonderforschungsbereich der DFG, mit besonderen Finanz- und Sachmitteln ausgestattete Zusammenfassung mehrerer Forschergruppen, die an einem gemeinsamen Projekt arbeiten.

**SINQ**, am Schweizer Institut für Nuklearforschung geplante Spallationsquelle

**SNQ** Spallationsneutronenquelle (Jülich)

**Spallation** Produktionsverfahren für -> Neutronen ohne Kernreaktor durch Beschuß einer Platte aus Schwermetall (Target) mit schnellen -> Protonen aus einem -> Beschleuniger. Dabei werden aus den Kernen des Targetmaterials Neutronen herausgeschlagen.

**Synchrotron** Ringbeschleuniger (siehe [2])

**TeV** Terra Elektron Volt (1000 Mrd -> eV)

**TUM** Technische Universität München