

Das Schweizerische Institut für Nuklearforschung (SIN), Villingen

Autor(en): **Steiner, Erich / Frosch, Reinhard / Perret, Charles**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Brugger Neujahrsblätter**

Band (Jahr): **91 (1981)**

PDF erstellt am: **11.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-901252>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Erich Steiner, Reinhard Frosch, Charles Perret Das Schweizerische Institut für Nuklearforschung (SIN), Villigen

Vor rund 10 Jahren hat sich im Bezirk Brugg ein wissenschaftliches Zentrum niedergelassen: das Schweizerische Institut für Nuklearforschung in Villigen, kurz SIN genannt. Organisatorisch ist es den Eidgenössischen Technischen Hochschulen angegliedert und somit eine auf nationaler Ebene geführte Forschungsanstalt.

Rund 2 km nördlich von Villigen ist von weitem die grosse Experimentierhalle zu sehen. Darin befindet sich das Kernstück des SIN, eine grosse Beschleunigeranlage (Zyklotron), mit der Protonen (Kerne des Wasserstoffatoms) auf rund 80% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Aus der Energie dieser Protonen werden neue Elementarteilchen in bisher unerreichter Intensität erzeugt und Wissenschaftlern in- und ausländischer Hochschulen für Experimente zur Verfügung gestellt.

Zum Aufbau der Atome

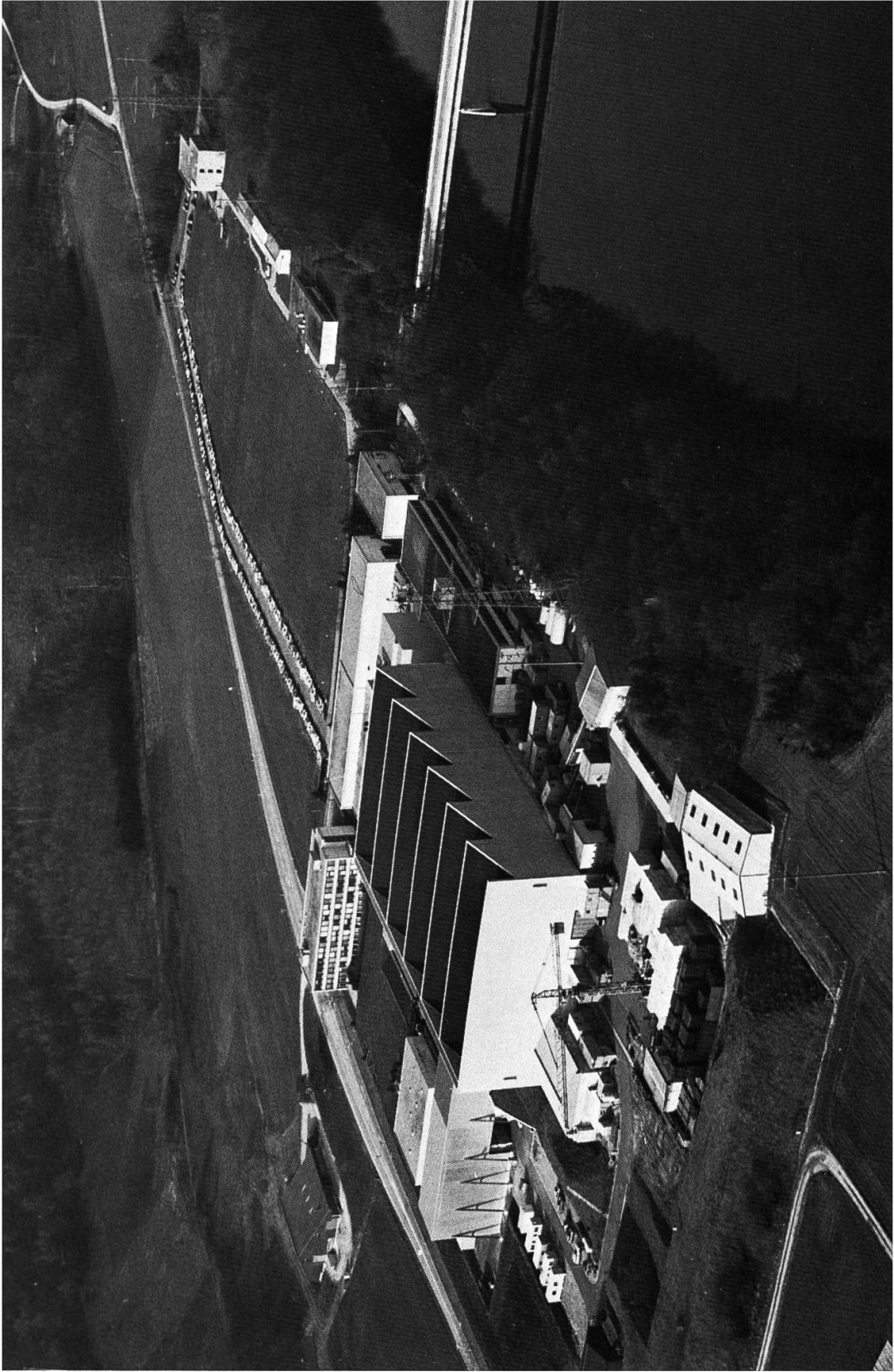
Erst kurz nach 1900 gelang es, die ersten Beweise für die Realität der Atome zu erbringen. Damit begann jene Epoche in der Geschichte der Atomphysik, die man oft als das Atomzeitalter bezeichnet. Bei der Erforschung der Atome stellte sich heraus, dass diese keineswegs die letzten und unwandelbaren Bausteine aller Materie sind, sondern dass sie im Gegenteil einen komplizierten inneren Aufbau besitzen. Ein Atom besteht aus einem kleinen, aber relativ sehr schweren Atomkern und aus leichten Elektronen, die den Atomkern umfliegen. Die Aufgabe der kernphysikalischen Forschung besteht nun darin, sich ein Bild vom inneren Aufbau der Atomkerne und ihrer Bausteine zu machen. Der Versuch allerdings, mit einem Lichtmikroskop das Innerste der Materie zu untersuchen, müsste – selbst mit den stärksten Linsen – fehlschlagen. Es ist prinzipiell unmöglich, Strukturen zu erkennen, die kleiner sind als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung. Erst durch die Entdeckung der energiereicheren und somit kurzwelligeren Röntgen- und

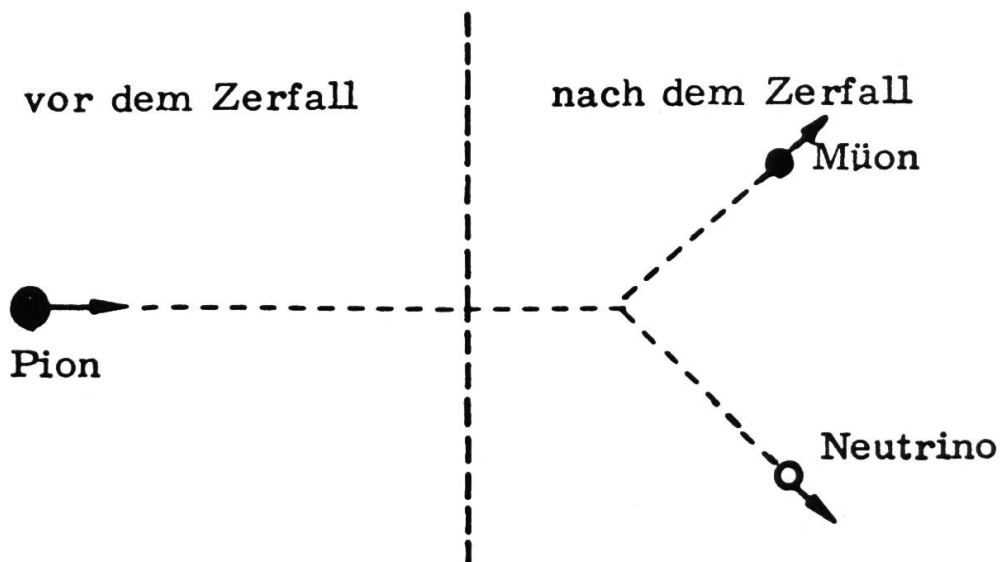
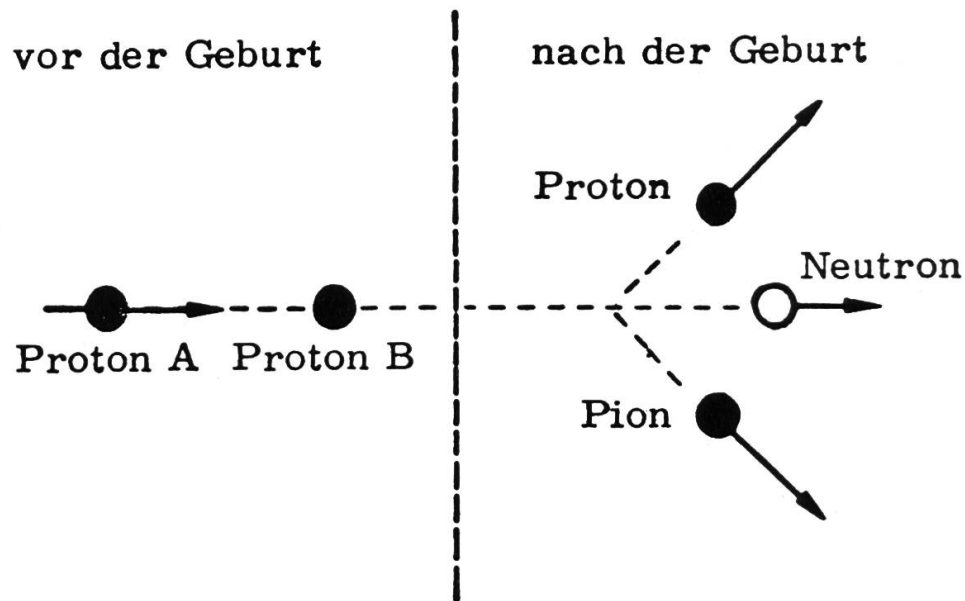
Elektronenstrahlen zu Beginn unseres Jahrhunderts konnten die Bausteine eines Kristalls auf einer photographischen Platte festgehalten werden. Mit modernen Elektronen-Mikroskopen lassen sich heute Vergrösserungen bis zu einer Million erzielen; Atome und ihre Bausteine jedoch verlangen nochmals millionenfach stärkere Vergrösserungen. Das bedeutet, dass die verwendete Strahlung millionenfach kurzweiliger und damit energiereicher sein muss als jene eines Elektronen-Mikroskops. Einrichtungen, die solche Strahlen erzeugen, heissen Beschleuniger. Mit ihnen lassen sich die Atomkerne untersuchen und in noch kleinere Einheiten zerlegen. Aber auch diese Bausteine der Atomkerne – die Protonen und Neutronen (auch Nukleonen genannt) – sind offenbar zusammengesetzte Teilchen. Für Untersuchungen in diesen kleinsten Dimensionen müssen Beschleuniger benützt werden, die Strahlen höchster Energie erzeugen.

Bei den Untersuchungen der Mikrostruktur der Materie fand man nicht nur neue Partikel, sondern man entdeckte auch neue Kräfte zwischen diesen Partikeln. Eine davon nennt man starke Wechselwirkung. Sie ist die stärkste aller bekannten Kräfte und bewirkt, dass die in den Atomkernen vorhandenen Nukleonen zusammengehalten werden. Mit dieser Kernkraft verbunden ist eine Gruppe von Elementarteilchen, die Mesonen genannt werden. Besonders interessante Mesonen sind die Pionen (Pi-Mesonen). Ihre Untersuchung ermöglicht die Abklärung wichtiger Fragen über den Aufbau der Atomkerne und der in ihnen herrschenden Kräfte. Für solche Studien benötigt man eine so grosse Zahl von Pionen, wie sie nur von sogenannten «Mesonenfabriken» erzeugt werden können. Am SIN zum Beispiel liefern die Pionenstrahlen bis zu einigen 10 Millionen Pionen pro Sekunde. Die Pionen sind etwa 230mal schwerer als Elektronen; sie können eine positive, negative oder gar keine Ladung tragen. In freiem Zustand zerfallen sie nach kurzer Zeit. Die geladenen Pionen zum Beispiel zerfallen nach rund zwanzig Milliardstel Sekunden in ein weiteres geladenes Teilchen, welches man Müon nennt, und ein neutrales Teilchen, das Neutrino. Auch das Müon

Das SIN am Westufer der Aare

Mitten im Gebäudekomplex erhebt sich die grosse Experimentierhalle. Die Aarebrücke rechts führt zum benachbarten EIR (Eidg. Institut für Reaktorforschung). Flugaufnahme vom März 1980





zum oberen Schema

«Geburt» eines positiv geladenen Pions. Die kinetische Energie des Protons A (Strahl aus dem Beschleuniger) wird beim Zusammenstoß mit einem Proton B (Target) teilweise in Masse des entstehenden Pions umgewandelt. Eines der beiden Protonen wandelt sich dabei in ein Neutron um.

zum unteren Schema

Zerfall eines positiv geladenen Pions. In fast allen Fällen zerfällt es in ein Müon und ein Müon-Neutrino.

wird am SIN für wichtige Untersuchungen über Kernoberflächen, Kristallstrukturen und in der Chemie verwendet.

Pionen werden folgendermassen erzeugt: Beschiess man mit Protonen genügender Energie einen Kern, wird der Kern in der Regel zerstört, und man findet unter den wegfliegenden Kerntrümmern Pionen. Ein Teil der Protonenenergie ist dabei für die Erzeugung eines Pions materialisiert worden (Einstein: $Masse \hat{=} Energie$). Technisch wird dazu ein Strahl von Protonen genügend hoher Energie auf ein Stück Material – Target genannt – fokussiert, wobei die Pionen entstehen. Diese werden dann durch elektromagnetische Linsen, das heisst spezielle Elektromagnete, zu den Experimentiereinrichtungen geleitet.

Neben den erwünschten Pionen entstehen beim Beschuss des Targets auch viele Neutronen, die es zum Schutze des Personals und der Apparaturen abzuschirmen gilt. Dazu sind wegen der grossen Durchdringungskraft der Neutronen meterdicke Mauern aus Beton und Eisen erforderlich. Diese riesigen Blockpyramiden prägen den Anblick der Anlagen.

Wie können nun die für die Pionen nötigen Protonen erzeugt, und wie kann ihnen Energie zugeführt werden? Das «Rohmaterial» dazu ist Wasserstoffgas. Wasserstoff ist das einfachste chemische Element, da sein Atomkern aus einem einzigen Proton besteht. In einer sogenannten Ionenquelle werden durch Beschuss mit Elektronen einzelne Protonen aus den Wasserstoffmolekülen freigesetzt (Ionisation). Ein solches Proton erfährt im elektrischen Feld zwischen zwei elektrisch geladenen Platten eine Kraft: es wird *beschleunigt*.

Die Beschleunigeranlage des SIN

Die Anlage ist ein zweistufiger Komplex. Die erste Stufe ist das *Injektorzyklotron I*, ein Beschleuniger, der die aus Ionisation von Wasserstoffgas erzeugten Protonen auf eine Energie von 72 MeV* bringt. Während rund eines Viertels der Betriebszeit wird das Injektorzyklotron I für Experimente in Niederenergie-Kernphysik und zur Erzeugung von Radioisotopen für die Anwendung in der Medizin eingesetzt.

* Die Einheit der Energie in der Atom- und Kernphysik ist das Elektronvolt, eV. 1 eV ist die Energie, die ein Teilchen mit dem Ladungsbetrag des Elektrons gewinnt, wenn es eine elektrische Potentialdifferenz von 1 Volt durchleitet.
1 MeV = 1 Million eV; 1 GeV = 1 Milliarde eV.

Während drei Vierteln der Zeit dient das Injektorzyklotron I dagegen zur Vorbeschleunigung eines Protonenstrahls von über 100 Mikroampère auf 72 MeV, der dann in der zweiten Stufe, dem *Ringzyklotron*, auf eine Endenergie von 590 MeV beschleunigt wird. Dieser Strahl dient für Experimente in Hochenergiephysik mit Protonen oder Pionen und Müonen (Mesonen).

Funktionsweise des Ringzyklotrons

Die Protonen werden im Zentrum des Ringbeschleunigers eingeschossen. Während die Magnetfelder zeitlich konstant bleiben, wechselt das elektrische Feld in den Kavitäten (oder Beschleunigungsstrecken) in der Sekunde 100 Millionen Mal seine Richtung (Hochfrequenz-Wechselspannung). Bei jedem Durchgang durch eine der Kavitäten erfahren die Protonen einen Energiezuwachs von rund 500 000 Elektrovolt (eV). Die Protonen laufen dabei auf einer Spiralbahn nach außen und vollführen etwa 250 Umläufe. Zur Extraktion der Protonen aus dem Ringzyklotron wird die äusserste Bahn durch ein spezielles elektrisches Extraktionsfeld geführt. Die Bahn wird gestört, und die Protonen können mit Hilfe weiterer Magnete aus dem Ring ausgelenkt werden. Magnetlinsen und Ablenkmagnete führen die Protonen nun zu den beiden Targetstationen, wo der Strahl auf rotierende Kohlenstoff- oder Beryllium-Teller auftrifft. Dabei werden Pionen erzeugt, die wiederum durch magnetische Elemente gesammelt und in die Experimentierareale gelenkt werden.

Das Ringzyklotron; eine Eigenentwicklung des SIN.

Wesentliche Bestandteile:

8 Sektormagnete zu je 250 t

4 Kavitäten, 50 MHz, je 500 kV Spitzenspannung

1 Kavität, 150 MHz

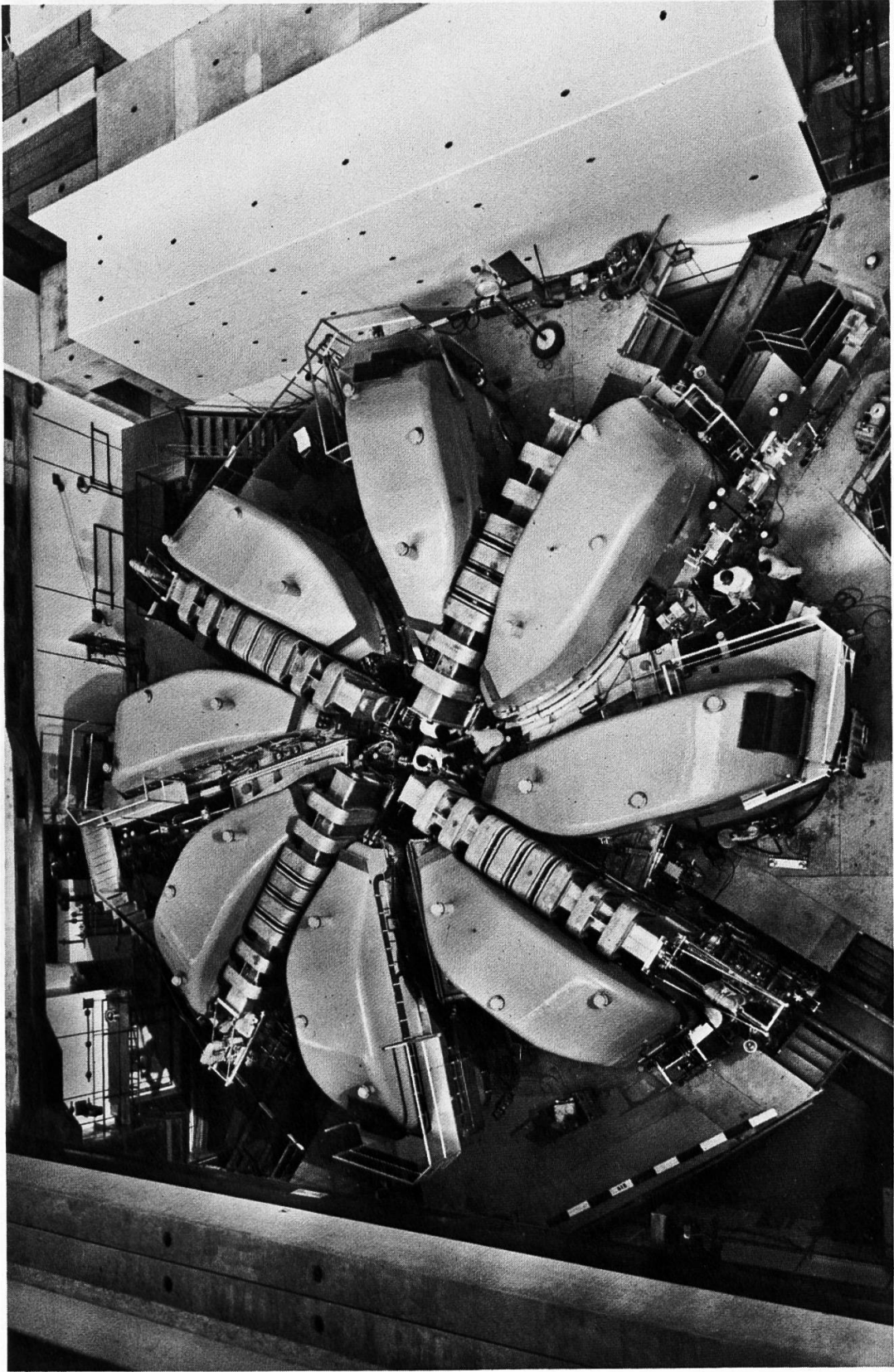
4 Hochfrequenz-Endstufen zu je 250 kW

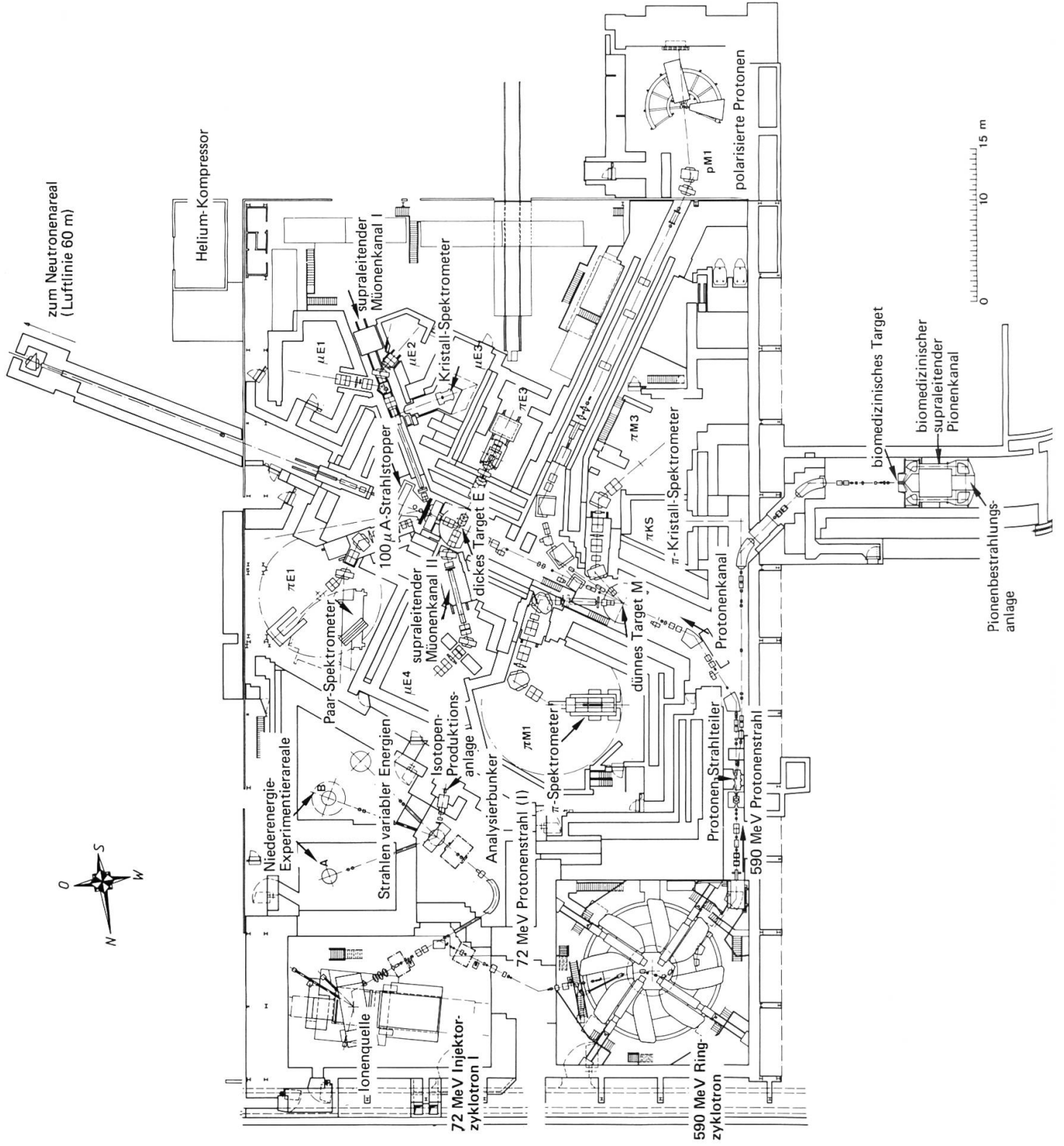
4 Vakuumpumpen

Injektionsstrahlführung (72 MeV)

Extraktionsstrahlführung (590 MeV)

Strahlsonden, Ablenkmagnete und elektromagnetische Linsen





zum Neutronenareal
(Luftlinie 60 m)

Helium-Kompressor



Niederenergie-
Experimentierareale

Strahlen variabler Energien

Isotopen-
Produktions-
anlage

Analysierbunker

72 MeV Protonenstrahl (I)

72 MeV Injektor-
zyklotron I

590 MeV Ring-
zyklotron

590 MeV Protonenstrahl

Protonenstrahlteiler

πE1

supraleitender
Müonenkanal I

100 μA-Strahlstopper

supraleitender
Müonenkanal II

dickes Target E

πE2

πE3

πE4

πM1

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

πE1

supraleitender
Müonenkanal I

100 μA-Strahlstopper

supraleitender
Müonenkanal II

dickes Target E

πE2

πE3

πE4

πM1

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

π-Kristall-Spektrometer

biomedizinisches Target

biomedizinischer
supraleitender
Pionenkanal

Pionenbestrahlungs-
anlage

polarisierte Protonen

0 10 15 m

Jährlich wird an rund 80 Experimenten gearbeitet. Die Gesamtzahl der am laufenden Forschungsprogramm beteiligten Wissenschaftler liegt heute bei 400, wobei die Anlagen des SIN an Gruppen aller schweizerischen Hochschulen zur Verfügung gestellt werden. Auch ausländische Institutionen beteiligen sich in grossem Umfang an der Forschungstätigkeit auf der Grundlage einer angemessenen Kostenbeteiligung. Die Anlagen des SIN stehen den Experimentatoren grundsätzlich 24 Stunden am Tag und 7 Tage in der Woche zur Verfügung. Angesichts der Tatsache, dass es auf der ganzen Welt nur noch zwei Forschungslaboratorien gibt, die Mesonen in diesem Ausmass erzeugen können (in Vancouver, Kanada, und in Los Alamos, USA), ist es verständlich, dass der Wunsch nach Strahlzeit durch die Experimentatoren sehr gross ist.

Im folgenden soll die Forschung, welche mit Pionen oder ihren Zerfallsprodukten – den Müonen – durchgeführt wird, kurz besprochen werden.

Grundlagenforschung

Das Ziel der Grundlagenforschung ist die Kenntnis der Naturgesetze. Die historische Erfahrung zeigt, dass die grossen technischen Fortschritte von Fortschritten der Grundlagenforschung bewirkt werden.

Als erstes Beispiel sei die Erforschung der elektromagnetischen Erscheinungen durch J.C. Maxwell im 19. Jahrhundert genannt. Maxwells Ziel war die Kenntnis der Naturgesetze. Einige Jahrzehnte später aber entstand aus seinen Arbeiten die Elektrotechnik, der ja gerade die schweizerische Industrie vieles verdankt.

Zweites Beispiel: Die Gesetze der sogenannten Quantenmechanik (Mechanik der kleinen Teilchen) wurden um 1926 entdeckt. Wiederum

Auslegung der SIN-Experimentierhalle.

Sie misst in der Länge 89 m, in der Breite 53 m und ist 24 m hoch. Ein 60-Tonnen-Kran mit einer Spannweite von 50 m überstreicht die ganze Bodenfläche. An der nördlichen Schmalseite finden die beiden Beschleunigermaschinen Platz.

Die Halle ist als Stahlkonstruktion mit Wänden aus vorfabrizierten Blechplatten in der Art einer Fabrikhalle als reiner Zweckbau erstellt worden.

mehrere Jahrzehnte später, nach dem zweiten Weltkrieg, führte die Weiterentwicklung der Quantenmechanik zur Erfindung des Transistors, der in unserer Gegenwart eine grosse und alles in allem sicher positiv zu bewertende Rolle spielt.

Diese zwei historischen Beispiele zeigen, dass es unmöglich ist, die zukünftige technische Bedeutung der Grundlagenforschung, zum Beispiel der am SIN betriebenen, schon jetzt zu erkennen. Die Beispiele zeigen aber auch, dass eine Industrienation, die als solche überleben will, Grundlagenforschung betreiben muss.

Die Grundlagenforschung am SIN befasst sich vor allem mit seltenen Prozessen von Elementarteilchen und Atomkernen sowie mit Präzisionsmessungen der Eigenschaften dieser Teilchen.

Mehrere grosse Forschungsprojekte haben am SIN bereits zu interessanten und weltweit beachteten Ergebnissen geführt, zum Beispiel die Suche nach seltenen Reaktionen und Zerfällen des Müons zur Prüfung eines bestimmten vermuteten Naturgesetzes (Erhaltung der sogenannten Müonenzahl) sowie die Präzisionsmessungen der Masse eines bestimmten Elementarteilchens (Müon-Neutrino) oder einer bestimmten magnetischen Eigenschaft des Müons (magnetisches Moment). Bei mehreren dieser gegenwärtig aktuellen Messungen ist das weltweit genaueste Resultat am SIN erzielt worden.

Mehrere Experimente betreffen die *Kernphysik mit Elementarteilchen*. Zu diesem Gebiet gehören zum Beispiel das Studium des pionischen und müonischen Atoms sowie die Streu-Experimente mit dem grossen Pionenspektrometer.

Anwendung von Pionen und Müonen in anderen wissenschaftlichen Gebieten und angewandte Forschung

Dazu gehören zum Beispiel die Untersuchungen atomarer Magnetfelder in Festkörpern mit Hilfe von Müonen (sogenannte Müon-Spin-Rotation). Ein weiterer Bereich der angewandten Forschung, und zwar auf medizinischem Gebiet, ist die Erzeugung *radioaktiver Isotope* für diagnostische Verwendung in der Nuklearmedizin. Seit 1974 wird in Zusammenarbeit mit dem EIR das Radio-Isotop Jod-123 am Injektorzyklotron I des SIN erzeugt und in Spitälern im In- und Ausland verwendet.

Ein bekanntes Projekt am SIN auf dem Gebiet der angewandten Forschung hat die *Radiotherapie des Krebses mit negativen Pionen* zum Inhalt.

Schon bei der Gründung des SIN hat ein Projekt zur Anwendung von Pionen in der Medizin bestanden. Ein «biomedizinischer» Strahl wurde im Dezember 1974 in Betrieb genommen, und ein umfangreiches biologisch-medizinisches Forschungsprogramm mit Pionen begann. Das allgemeine Problem der Radiotherapie ist die Abgabe einer den Tumor zerstörenden Strahlendosis unter gleichzeitiger Schonung des gesunden Gewebes ausserhalb des Tumorumfanges.

Die negativ geladenen Pionen haben in dieser Hinsicht wesentlich günstigere Eigenschaften als die jetzt gebräuchlichen Strahlenarten. Es wird erwartet, dass dadurch die Heilungschancen bei tiefliegenden, grossen Tumoren verbessert werden.

Die Pionen haben als geladene Teilchen eine bestimmte Reichweite im menschlichen Gewebe. Am Ende ihrer Bahn werden die negativen Pionen von positiven Sauerstoff-, Kohlenstoff- oder Stickstoffkernen eingefangen. Dabei wird die Masse des Pions in Energie umgewandelt, wodurch der getroffene Kern explodiert; nukleare Fragmente fliegen in alle Richtungen. Von den nahezu 140 MeV Energie des Pions dienen 40 MeV zur Überwindung der Bindungsenergie des Einfangkerns, rund 70 MeV sind kinetische Energie von Neutronen und rund 30 MeV werden in kinetische Energie von Protonen, Alphateilchen und Schwerionen umgewandelt. Diese sind es, welche die angestrebte lokale Strahlenwirkung erzeugen.

Radiotherapeutische Anwendung negativer Pionen

Die Wirkung der Pionen entfaltet sich auf natürliche Weise im Zentrum des Tumors, was im Gegensatz zu den bisherigen Bestrahlungsmethoden steht. Die Tiefe, bei welcher die Pionen das kranke Gewebe eines Tumors zerstören, lässt sich mittels der Strahlenenergie leicht einstellen. Die durch die Pionensterne ausgestossenen Fragmente haben eine starke Ionisierung und eine erhöhte biologische Wirksamkeit.

Ein Teil der Tumorzellen ist schlecht mit Sauerstoff versorgt; daraus resultiert bei konventionellen Strahlenarten ein Schutzeffekt für diese Zellen. Ein Teil des Tumors ist also strahlenresistenter als das umgebende gesunde Gewebe. Dieser ungünstige Effekt ist bei dicht ionisie-

renden Strahlen wie Alphateilchen und schweren Ionen, die von den Pionensternen ausgesandt werden, schwächer.

Der wesentliche Vorteil der negativen Pionen ist ihre Eigenschaft, eine sehr grosse Energie am Ende ihrer Bahn abzugeben. Man kann somit in die Tiefe zielen und die erforderliche hohe Strahlendosis im Tumorgebiet abgeben, ohne das umliegende Gewebe zu belasten. Selbst wenn das Tumorgebiet eine komplizierte Form hat, kann man die Bestrahlung sehr genau auf dieses Gebiet beschränken.

Die Piotron-Anlage

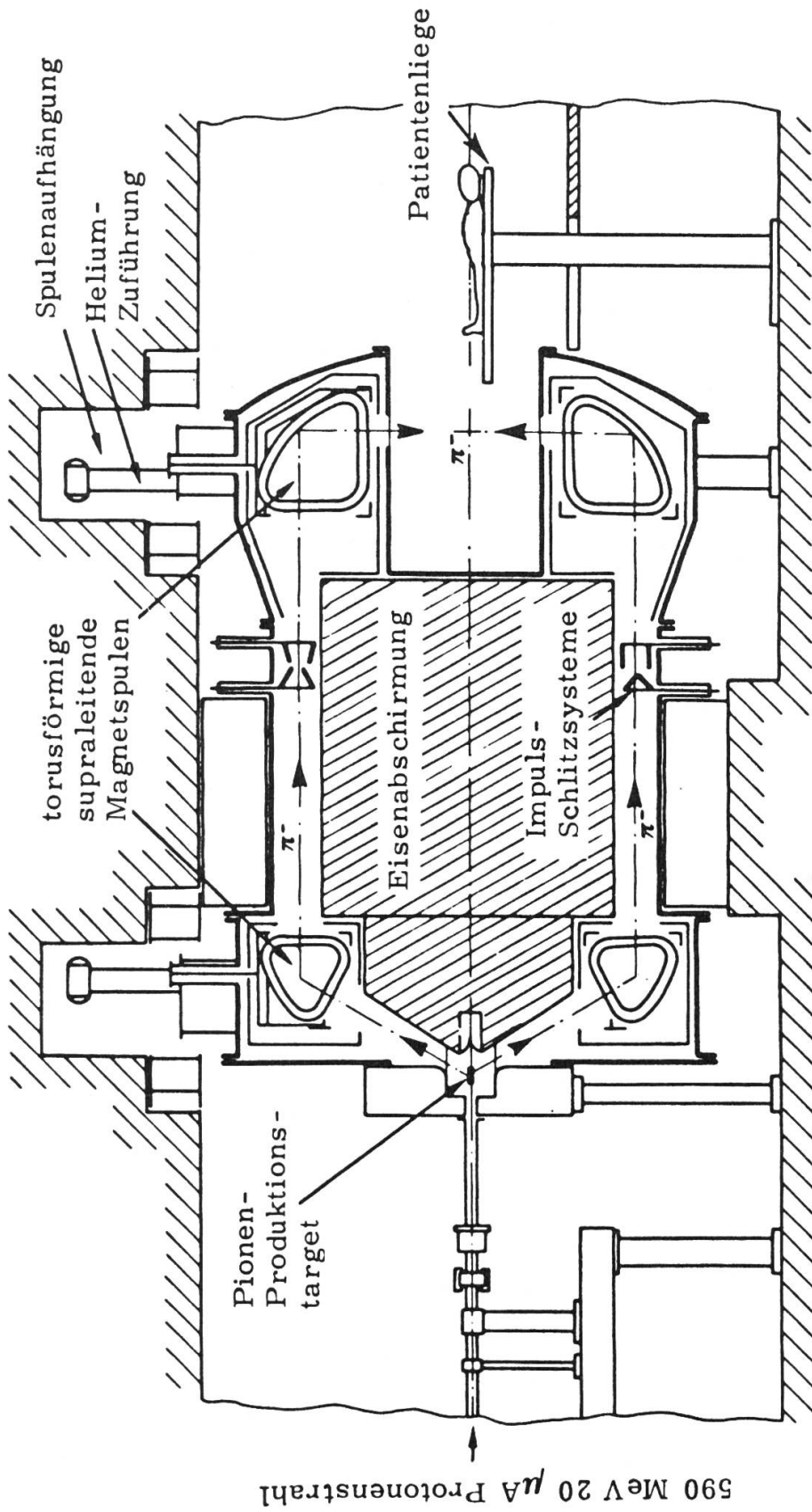
Nach einem Konzept der Stanford University (USA) ist am SIN ein Applikator (Piotron) gebaut worden, der durch zwei Ringe von supra-leitenden Magneten 60 Strahlen konzentrisch auf den Patienten einfal-len lässt.

Die 60 Strahlen geben einen fixen Strahlenfleck von rund 2 cm Durchmesser. Der Patient wird auf einem computergesteuerten Koor-dinatentisch derart bewegt, dass dieser Fleck das ganze Tumorgebiet gleichmässig bestrahlt. Das Piotron ist am 22. Juni 1980 erstmals er-folgreich in Betrieb genommen worden.

In einer ersten Phase werden umfangreiche physikalische und biolo-gische Messungen (an Zellkulturen und Labormäusen) genaue Daten über die Strahlen liefern. Ab Ende 1980 wird – mit vergleichsweise ein-fachen Fällen beginnend – die klinische Anwendung etappenweise an-laufen.

Die Piotron-Anlage

- links im Bild trifft der Protonenstrahl aus dem Ringbeschleuniger auf das Target, wo die Pionen erzeugt werden
- 120 supraleitende Spulen, wovon je 60 in einem Ring angeordnet sind, dienen zur Bündelung und zur Ablenkung der Pionen, um sie dann auf den Tumor zu lenken.
- eine Eisenabschirmung von 3.2 m Dicke schützt den Patienten vor uner-wünschten Strahlungen (hauptsächlich hochenergetische Neutronen)
- die Magnete und 200 t Eisenabschirmungen befinden sich unter Hoch-vakuum in einem Stahlzylinder von 4.7 m Durchmesser und 7 m Länge.



Die Radiotherapie mit negativen Pionen ist seit vier Jahren in Los Alamos (USA) – allerdings mit einem Einzelstrahl – bereits in klinischer Erprobung. Die ersten Resultate an etwa 150 Patienten sind ermutigend.

Ziel des Projektes am SIN ist es, die hervorragenden Eigenschaften der Pionen für die Behandlung des Krebses zu erschliessen und auszunutzen. Dazu werden am SIN dank dem Piotron auf viele Jahre hinaus die weltweit besten apparativen Voraussetzungen bestehen. Organisatorisch und medizinisch besteht bereits eine enge Zusammenarbeit mit dem Kantonsspital Aarau. Wenn die in die Pionen gesetzten Erwartungen erfüllt werden, wird die am SIN installierte Anlage zur therapeutischen Anwendung Patienten aus dem In- und Ausland zugänglich gemacht. Grosser Wert wird auf Kontakte mit allen interessierten Fachrichtungen der Medizin und der Strahlenbiologie gelegt. Es besteht bereits ein starkes Interesse an einer Mitwirkung seitens verschiedener europäischer Kliniken.