



## Teilchenbeschleuniger in industriellen Anwendungen – von der Forschung zur breiten Anwendung

Wenn es darum geht, Material zu untersuchen, zu prüfen, zu bearbeiten oder zu modifizieren, ist die Nutzung beschleunigter geladener Teilchen eine Möglichkeit mit zunehmendem Potenzial.

### Ausgangslage

#### Die Historie

Wilhelm Conrad Röntgen selbst verwendete 1895 bei der Entdeckung der später nach ihm benannten Röntgenstrahlung eine Röhre mit Restgas, in der Elektronen durch eine hohe Spannung aus einem Rühmkorff-Generator beschleunigt wurden, die beim Auftreffen auf ein Target (bei ihm zuerst die Glaswand der Röhre, wenig später bereits ein effektiveres Metalltarget) Röntgen-Bremsstrahlung erzeugt. Coolidge entwickelte 1913 die erste „richtige“ Röntgenröhre mit beheizter Kathode als Elektronenquelle, Metalltarget und Hoch-Vakuum in der Glasröhre, die bis heute die wesentlichen Konstruktionsmerkmale einer Röntgenröhre sind.

Die maximalen Beschleunigungsspannungen von Röntgenröhren liegen aufgrund der begrenzten Isolation gegenüber Masse bei ca. 800 kV. Für die Durchdringung hoher Materialdicken sind jedoch höhere Elektronenenergien und Beschleunigungsspannungen erforderlich. Diese sind aber mit einer (begrenzten) Beschleunigungsspannung und einer möglichst kurzen, linearen Beschleunigungsstrecke für die Elektronen nicht realisierbar.

Deshalb kam Wiederöe ca. 1925 auf die Idee, durch eine kreisförmige Beschleunigung von Elektronen in einem pulsierenden Magnetfeld (Elektronenschleuder oder Strahlentransformator vom ihm genannt) höhere Beschleunigungsenergien als 1 MeV (Megaelektronenvolt) zu erzielen. Allerdings war die experimentelle Arbeit dazu in Karlsruhe aufgrund diverser Schwierigkeiten nicht erfolgreich, er durfte dazu keine Dissertation einreichen. Deshalb brach er die Arbeiten ab und ging an die TH Aachen, wo er mit dem Prinzip des Linearbeschleunigers 1927 erfolgreich promovierte.

Seine Promotionsschrift hatte 27 Seiten und beschrieb die Bewegung der Elektronen in einem hochfrequenten wechselnden elektrischen Feld, welches wesentlich einfacher zu erzeugen ist. Dieses Prinzip wurde später mit den im 2. Weltkrieg entwickelten Mikrowellengeneratoren (S-Band bei 3 GHz) für RADAR gekoppelt und damit der LINAC („LINear ACcelerator“), wie er noch heute Verwendung findet, geschaffen. Dieser kann Beschleunigungsenergien für Elektronen bis zu 50 MeV erreichen.

Wiederöe ließ nach den Startschwierigkeiten seiner Elektronenschleuder nicht locker und bekam schließlich die Schwierigkeiten in den Griff. Es dauerte jedoch noch bis 1943, bis Wiederöe eine funktionierende „Elektronenschleuder“ vorweisen konnte, die heute als 15-MeV-Betatron im Museum für deutsche Geschichte in Bonn steht.

Lawrence entwickelte im Berkeley Radiation Lab ab 1928, inspiriert durch die Promotion von Wideröe, das Zyklotron zur Beschleunigung geladener Teilchen. Er erhielt dafür 1939 den Nobelpreis.

### **Aktuelle Technik**

Heute sind LINACs für Elektronen-Energien von 1 MeV bis 15 MeV sowohl für medizinische als auch für technische Anwendungen (Aktivierungsanalyse und zerstörungsfreie Materialprüfung) im Einsatz.

Große Hersteller sind Varian in den USA, Siemens in Deutschland und Nuctech in China. Eine Vielzahl kleinerer Hersteller existiert ebenfalls. Allen zusammen ist das Prinzip eigen, dass im LINAC Elektronen linear oder im Betatron kreisförmig beschleunigt werden, bevor sie auf ein Target treffen, in dem Röntgen-Bremsstrahlung erzeugt wird, die schließlich die verwendete Strahlungsform ist.

Wenn jedoch das Target aus einem schweren Metall (Wolfram etc.) durch ein leichtes Target wie Titan ersetzt wird, penetrieren die beschleunigten Elektronen dieses Fenster zum Vakuum im LINAC. Je nach Elektronenenergie können sie einige Zentimeter in Luft fliegen, bevor sie wechselwirken. Auf dieser Strecke können sie zur Materialbearbeitung (Vernetzung von Kunststoffen) oder zur Sterilisation (auch zum Entkeimen von Wasser) verwendet werden.

Die zuerst an der Beschleunigung von Elektronen erprobten Prinzipien lassen sich auch zur Beschleunigung von Ionen verwenden. Eigentlich neutral geladene Atome werden durch das Entfernen von Elektronen ionisiert. Die dann freien positiv geladenen Ionen werden beschleunigt: positive Ladungen stoßen sie ab, negative ziehen sie an, und schon nach wenigen Metern haben die Ionen nahezu Lichtgeschwindigkeit erreicht.

Diesen Effekt nutzen Teilchenbeschleuniger zur Materialforschung, -untersuchung, -prüfung und -bearbeitung. Selbst in der Medizintechnik finden sich Anwendungen bei der Medikamentenentwicklung und in der Strahlentherapie zur Krebsbehandlung.

### **Aktuelle Entwicklungen**

#### **Wer kann was – und was ist möglich?**

Es gibt zwei Arten von Teilchenbeschleunigern: elektrostatische und elektromagnetische. Elektrostatische Beschleuniger verwenden Gleichspannungen zur Beschleunigung (Cockcroft-Walton oder Van-de-Graaf-Generator). Die erreichbare Energie der zu beschleunigenden Teilchen ist deshalb limitiert.

In den elektromagnetischen Beschleunigern durchlaufen die zu beschleunigenden Teilchen mehrfach veränderliche elektromagnetische Felder, z. B. in einem Ring. Diese Art von Teilchenbeschleunigern existiert heute in einer Vielzahl von Installationen in fast allen Ländern der Welt für eine Vielzahl von Anwendungen. Die Teilchenenergien können dabei vom Bereich MeV bis über 100 GeV je nach Anwendung variieren.

Neben Elektronen als leichteste Teilchen werden auch Protonen (medizinische Onkologie) beschleunigt sowie fast alle anderen Atome, sofern sie sich ionisieren lassen. Nur bei Neutronen können keine Beschleuniger verwendet werden, da diese elektrisch neutral sind. Dafür gibt es jedoch verschiedene Arten von Neutronengeneratoren.

#### **Anwendungen in der Forschung**

Auf die Teilchenbeschleuniger des CERN in Genf schaut die ganze Welt. Auch deutsche Forscher und Institutionen beteiligen sich hier an verschiedenen Experimenten, darunter die vier großen LHC-Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHC-B, die unter anderem das Higgs-Boson entdeckt haben.

In Darmstadt baut das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung derzeit den neuen FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), eine der größten Teilchenbeschleuniger-Anlagen weltweit.

In Deutschland gibt es mehrere Forschungsanlagen mit Teilchenbeschleunigern, darunter:

- Das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY), das in Hamburg und Zeuthen mehrere Teilchenbeschleuniger betreibt, darunter das PETRA III, das Synchrotronstrahlung für Experimente in den Bereichen Materialwissenschaften, Physik, Chemie, Medizin, Materialwissenschaft und Biologie erzeugt.
- Die European XFEL GmbH, die zwischen Hamburg und Schleswig-Holstein einen Freielektronen-Laser betreibt, basierend auf einem linearen Elektronen-Beschleuniger mit 17,5 GeV erzeugt dieser intensivste kurzpulsige Röntgen-Blitze für Anwendungen in Physik, Chemie, Medizin, Materialwissenschaft und Biologie.
- Die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), die in Darmstadt den Schwerionenbeschleuniger SIS18 betreibt, der für die Erforschung von schweren Ionen in der Kern- und Teilchenphysik verwendet wird. An der GSI werden die Beschleuniger auch zu medizinischer Tumor-Therapie und Instrumentenentwicklung genutzt.
- ANKA am KIT in Karlsruhe: Mit beschleunigten Elektronen auf Kreisbahnen wird Synchrotronstrahlung erzeugt.

### Anwendungen bei der Materialprüfung

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) betreibt in Berlin am Synchrotron BESSY II die BAM-Beamline mit monochromatischer Röntgenstrahlung bis zu 60 keV zur Materialanalyse und Computertomographie mit Auflösungen kleiner als 1 µm. Aber auch am Synchrotron „ANKA“ in Karlsruhe, im HZDR Rossendorf der Helmholtz-Gesellschaft wird eine vielfältige Materialforschung betrieben.

### Industrielle Anwendungen

Jenseits der atemberaubenden Forschungen an den kleinsten bekannten Bausteinen der Materie finden Teilchenbeschleuniger zunehmende Anwendungen in der Industrie. Und damit steigt der Bedarf nach Sicherheitsnormen.

Weiter befeuert wird die Anwendung der Technologie durch die Entwicklung immer kleinerer Beschleuniger. So hat die TU Darmstadt zusammen mit Partnern an einem lasergetriebenen Elektronenbeschleuniger geforscht, der auf einen Siliziumchip passt und kleiner als ein Fingernagel ist.

Teilchenbeschleuniger haben vielfältige Anwendungsfälle in der Industrie, wie:

- Materialuntersuchung oder -prüfung – zur Untersuchung von Materialien auf atomarer und molekularer Ebene: Diese Technik, bekannt als „strahlungsinduzierte Analyse“ oder „Ionenstrahl-Analytik“, ermöglicht die Charakterisierung von Materialzusammensetzungen, Dicken und Strukturen. Dies ist in der Halbleiterindustrie, der Automobilindustrie und anderen Bereichen von großer Bedeutung.
- Materialmodifikation – um chemische Bindungen zu brechen oder neue Bindungen zu bilden: Diese Technik wird beispielsweise verwendet, um Oberflächeneigenschaften von Materialien zu verbessern, wie Härte, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Solche modifizierten Materialien finden Anwendung in der Herstellung von Werkzeugen, Bauteilen und medizinischen Implantaten.

Diese sind nur einige Anwendungsbereiche in der Industrie, womit der Einsatz von Teilchenbeschleunigern im industriellen Sektor an Bedeutung gewinnt – und damit auch die Normung zur Sicherstellung der Sicherheit bei der Anwendung und Wartung.

### **Anwendungen in der Medizintechnik**

Bereits 2019 hat BioNTech die Anlage des DESY zur Entwicklung seines neuen mRNA-Impfstoffs genutzt, um die erzielten Ergebnisse für die Optimierung der sogenannten Nanocarrier zu nutzen, mit denen die mRNA transportiert wird. Nur ein Beispiel für die Anwendung bei der Entwicklung von Medikamenten.

In vielen Krankenhäusern befinden sich Teilchenbeschleuniger für die Strahlentherapie. Ziel dieser Anlagen ist, Tumorzellen zielgenau zu zerstören und dabei das umgebende gesunde Gewebe zu schonen.

Die deutsche Mitarbeit bei der Erarbeitung internationaler Normen zu Teilchenbeschleunigern in der Medizintechnik (z. B. ISO 24427 „Medical proton accelerators“) und deren nationale Umsetzung wird im DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR) geleistet.

### **Fazit und Ausblick**

#### **Handlungsbedarf und bereits etablierte elektrotechnische Normen**

Durch die vermehrte Nutzung im industriellen Sektor fließen neue Faktoren in die Normung ein, die berücksichtigt werden müssen. Durch die erwartete Verbreitung der Anwendung von Teilchenbeschleunigern werden nicht mehr nur erfahrene Wissenschaftler und Elektrotechniker die Geräte nutzen und warten. Hierdurch ergibt sich ein Gefährdungspotential für die Gerätebediener und das Wartungspersonal, dem durch geeignete Normen begegnet werden muss.

Für industrielle Anwendungen ist national die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik zuständig, konkret deren Komitee DKE/K 967 „Mess-, Steuer- und Regelungstechnik im Zusammenhang mit ionisierender Strahlung“.

So hat das DKE-Komitee Anfang 2023 die Norm DIN IEC 63175 (VDE 0412-40):2023-01 „Proton-Zyklotrone für hohe Intensität, feste Energie und einem Energiebereich von 10 MeV bis weniger als 30 MeV“ veröffentlicht.

Zum 1. August 2023 folgte dann die DIN EN IEC 62976 (VDE 0412-30):2023-08. Diese gilt für Elektronenlinearbeschleuniger-Anlagen für die Zerstörungsfreie Prüfung im Energiebereich von 1 MeV bis 15 MeV. Eingeschlossen ist Beschleunigerausrüstung für radiographische Filme, Computer-Radiographie mit Speicherfolien (CR), Echtzeit-Bildgebung (Real-time), digitale Matrixdetektoren (DDA) und industrielle Computer-Tomographie (CT).

#### **Aktuelle internationale Arbeiten**

IEC/TC 45 hat den Arbeitskreis „Particle accelerators“ gebildet, der neben der Weiterentwicklung der o.g. Norm auch eine ganze Reihe von zusätzlichen Themen adressieren soll. Sein Aufgabenbereich ist wie folgt definiert: Erarbeitung von Normen und Leitlinien bezüglich Beschleuniger geladener Teilchen für Forschung, Industrie, Landwirtschaft, Gesundheitswesen und den technologischen Austausch mit Schwerpunkt auf Eigenschaften und Prüfverfahren.

Aktuell in Arbeit ist die IEC 63507 „Nuclear instrumentation – 200 MeV to 400 MeV superconducting proton cyclotron – General requirements and test methods“ und die IEC 63589-1 „Electron linear accelerator for radiation processing – General requirements and test methods“.

Als weitere relevante Themen wurden benannt bzw. bereits das betreffende offizielle New Work Item Proposal verteilt:

- Regeln für den Strahlenschutz bei Teilchenbeschleunigern;
- Norm für Elektronenbeschleuniger für die Bestrahlung;
- Spezifikation für Betrieb und Wartung von Elektronenbeschleunigern für die Bestrahlung;
- Norm für Elektronenlinearbeschleuniger für die Zerstörungsfreie Prüfung;
- Spezifikation der Strahlungsabschirmung von supraleitenden Protonen-Zyklotronen.

Die DKE ermöglicht über das DKE/K 967 „Mess-, Steuer- und Regelungstechnik im Zusammenhang mit ionisierender Strahlung“ die Mitarbeit deutscher Experten in dem internationalen Arbeitskreis und wird die dort erzielten Ergebnisse als Deutsche Normen umsetzen.

## Autoren dieses Beitrags

<b>Georg Vogel</b> Normungsmanager Abteilung Industry  DKE – Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik Offenbach am Main	<b>Dr. rer. nat. Uwe Zscherpel</b> Experte für zerstörungsfreie Prüfung  BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin
---	---

## Literaturhinweise

- (1) DIN EN IEC 62976 (VDE 0412-30):2023-08, Industrielle Ausrüstung für die zerstörungsfreie Prüfung – Elektronenlinearbeschleuniger (IEC 62976:2017 + A1:2021); Deutsche Fassung EN IEC 62976:2019 + A1:2022
- (2) DIN IEC 63175 (VDE 0412-40):2023-01, Proton-Zyklotrone für hohe Intensität, feste Energie und einen Energiebereich von 10 MeV bis weniger als 30 MeV (IEC 63175:2021)
- (3) Projekt IEC 63507, Nuclear instrumentation – 200 MeV to 400 MeV superconducting proton cyclotron – General requirements and test methods
- (4) Projekt IEC 63589-1, Electron linear accelerator for radiation processing – General requirements and test methods

## Hinweis

Die Erstveröffentlichung dieses Fachbeitrags erfolgte in „DIN-Mitteilungen + Elektronorm“, Ausgabe 10/2024.