

University of Groningen

Non-Interceptive Beam Current and Position Monitors for a Cyclotron Based Proton Therapy Facility

Srinivasan, Sudharsan

DOI:

[10.33612/diss.149817352](https://doi.org/10.33612/diss.149817352)

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2021

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Srinivasan, S. (2021). *Non-Interceptive Beam Current and Position Monitors for a Cyclotron Based Proton Therapy Facility*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen. <https://doi.org/10.33612/diss.149817352>

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Nederlandse samenvatting

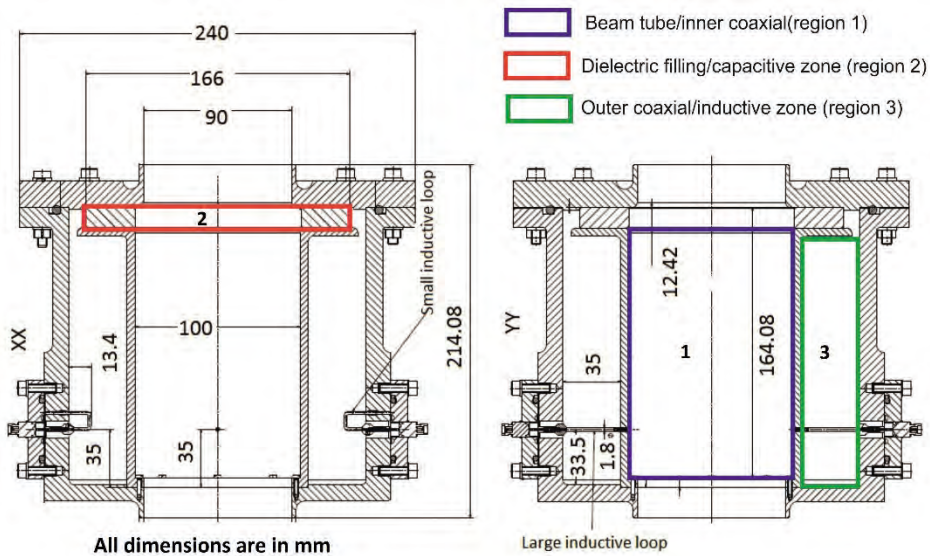
Dit proefschrift beschrijft de ontwikkeling van twee niet-interceptieve instrumenten voor het meten van bundelstroom en bundelpositie in de bundellijnen van de PROSCAN protontherapie kliniek van het Paul Scherrer Instituut (Villigen, Zwitserland). De motivatie voor deze ontwikkeling is dat deze metingen nu gedaan worden met ionisatiekamers (IC's) die de kwaliteit van de bundel teveel verslechteren door meervoudige verstrooiing. Op basis van de bundeleigenschappen en bundelstroom (0.1 – 10 nA) is ervoor gekozen te onderzoeken of met een resonante trilholte een goede meting van de bundelintensiteit (nauwkeurigheid 0.05 nA) en bundelpositie (nauwkeurigheid 0.5 mm) te realiseren is. Verder was de mogelijkheid een eenvoudige en compacte mechanische constructie zonder bewegende delen te realiseren, een belangrijke rol bij deze keuze.

Trilholte voor meting bundelintensiteit

Met behulp van ANSYS HFSS-simulaties is een compacte trilholte ontworpen waarmee de bundelintensiteit gemeten kan worden (Figuur 1). De trilholte bevindt zich rondom de bundel en bestaat uit een capacitief deel (rood gemarkeerd in Figuur 1) en een kortgesloten coaxiale geleider (groen in Figuur 1) die als inductief deel fungeert. Door een materiaal met hoge diëlektrische constante (MACOR) in het inductieve deel te plaatsen kan een compacte trilholte gerealiseerd worden. In deze trilholte wordt de fundamentele monopool resonantie (TM₀₁₀) op vergelijkbare wijze aangeslagen als in een eenvoudige cilindrische resonator. De afmetingen van de trilholte zijn zodanig dat de frequentie van de TM₀₁₀ magnetische monopool resonantie 145,7 MHz is, de tweede harmonische is van de herhalingsfrequentie van de protonenbundel (72,85 MHz) om interferentie met de veel sterkere signalen van de cyclotron RF-systeem bij de grondfrequentie van 72,85 MHz te vermijden. De tweede harmonische heeft de hoogste amplitude van alle harmonischen.

Een van de belangrijke ontwerpcriteria is het realiseren van een maximale overdrachtscoëfficiënt tussen de bundel en het signaal op de inductieve uitkoppellussen in het coaxiale deel van de trilholte, om ook bij lage bundelintensiteit (0.1 – 1 nA) nog een voldoende grote signaal-ruis verhouding te

hebben. Een bijkomend voordeel hiervan is dat de kwaliteitsfactor van het holte-systeem verlaagd wordt, waardoor het verkregen signaal minder gevoelig is voor kleine verschillen tussen de frequentie van de TM₀₁₀ resonantie van de trilholte en de herhalingsfrequentie van de bundel. De trilholte heeft vier inductieve koppelingen (twee kleine en twee grote) om het afstemmen van de resonantie te vergemakkelijken (één grote pickup als resonantietrombone) en voor online verificatie van de resonantiefrequentie (de kleine pickups). Deze ontwerpkeuze geeft in het prototype veel flexibiliteit bij het meten van de karakteristieken van de trilholte, maar leidt wel tot 50 % minder vermogen van het uitgekoppelde signaal in vergelijking met een ontwerp met enkele uitkoppellus.

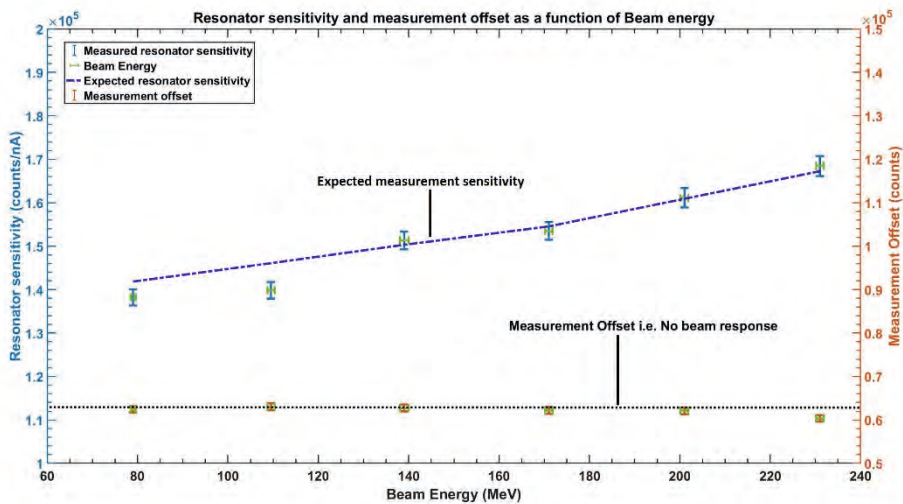


Figuur 1: Geometrie van de trilholte voor meting van de bundelintensiteit. De belangrijkste afmetingen zijn gegeven in mm. Het capacitieve deel van de trilholte is in het linker deel van de figuur in rood aangegeven, het inductieve deel in groen in het rechterdeel. De centrale opening waar de bundel doorheengaat is in het rechterdeel aangegeven in magenta.

Volgens zowel de ANSYS HFSS simulaties als analytische berekeningen zou het uitgekoppelde signaal ongeveer 15 nV voor een bundelstroom van 1 nA moeten zijn, hetgeen goed meetbaar is. Hiermee was er ruimschoots voldoende basis om een prototype te construeren. Het prototype is eerst gekarakteriseerd op een testbank door het meten hoe de S-parameters van de verschillende uitkoppelingen variëren als functie van de frequentie, zowel onderling als ten opzichte van een analogon van de deeltjes bundel. Die bundel-analogon is een dunne koperdraad op de symmetrie-as van de trilholte waardoor een stroom loopt, die in de tijd sinusvormig varieert. De gemeten S-parameters waren in goede

overeenstemming met de simulaties. De frequentie van de TM010 resonantie lag echter ongeveer 2% hoger dan de ontwerpfrequentie vanwege een verschil van 5% in de diëlektrische constante van de Macor-ring. Met behulp van een nieuwe Macor-ring is de frequentie van de TM010 resonantie afgestemd op 145,7 MHz waarna het uitgekoppelde signaal op deze frequentie overeenkwam met de berekeningen.

Na de validatie op de testbank is het prototype geïnstalleerd in de PROSCAN-bundellijn op ongeveer zestien meter van de uitgang van de degrader, waarmee tijdens de bestralingen de energie van de protonenbundel wordt geregeld. De degrader introduceert een aanzienlijke energiespreiding in de protonenbundel, die tot gevolg heeft dat de tijdsduur van de bundelpakketjes groter wordt met de afstand tot de degrader. Hierdoor wordt de amplitude van de tweede harmonische component van het bundelsignaal, die gebruikt wordt voor de meting, kleiner en daarmee ook de gevoeligheid van het meetsysteem. Metingen van de respons van de trilholte over het energiebereik 70 - 238 MeV (Figuur 2) stemmen binnen 5% overeen met de voorspelde afhankelijkheid.



Figuur 2: Gevoeligheid en achtergrondsignaal als functie van de bundelenergie. De foutengrens van de datapunten is weergegeven met de standaarddeviatie van de metingen. De blauwe stippellijn is de verwachte resonatorgevoeligheid; de zwarte het achtergrondsignaal, dat gemeten worden zonder bundel.

Met de trilholte kunnen bundelstromen vanaf 0.15 nA gedetecteerd worden met een 3σ onzekerheid van 0,05 nA met een bestaand elektronisch meetsysteem en een integratietijd van 1 seconde. De gevoeligheid kan worden verbeterd met

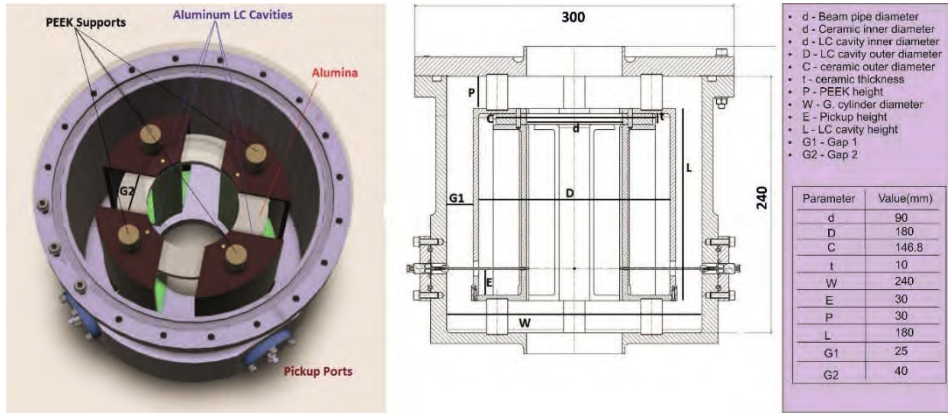
ongeveer een factor 1.5, door de ongebruikte opneempoorten elektrisch open te laten of met een betere impedantieaanpassing op de uitgang van de uitkoppellus. Dit zou de detectiedrempel verlagen tot 0,1 nA met een resolutie van 0.03 nA. De gevoeligheid kan ook worden verbeterd van 15 nV naar 17.5 nV per nA bundelstroom, door het Macor te vervangen door aluminiumoxide dat aanzienlijk minder diëlektrische verliezen heeft.

Vier-kwadrant trilholte voor meting bundelpositie

Voor het meten van de bundelpositie is een viervoudige trilholte ontwikkeld: in ieder kwadrant van een cylinder om de bundel, is een trilholte geplaatst die bestaat uit twee parallele platen met een diëlektricum ertussen (capaciteit), verbonden via een lus (zelfinductie). Als de bundelpositie niet samenvalt met de symmetrieas van dit hele systeem zal de amplitude van het signaal in de vier trilholtes niet indentiek zijn. Hieruit kan dan de bundelpositie afgeleid worden. De werking van dit systeem is vergelijkbaar met die van een cilindrische trilholte die resoneert in de TM₁₁₀ magnetische dipool mode. De meetgevoeligheid wordt hoofdzakelijk bepaald door de genormaliseerde parallelweerstand van de trilholte, de elektrische koppeling tussen bundel en trilholtes en de positie en grootte van de inductieve lus waarmee het magnetische veld in de trilholte wordt uitgekoppeld. Om een zo hoog mogelijke interne kwaliteitsfactor van de trilholtes te bereiken is gekozen voor aluminiumoxide van hoge zuiverheid (99.5 %) als diëlektricum. Hiermee worden de signaal-ruis en signaal-achtergrond verhouding aanzienlijk verbeterd in vergelijking met Macor. Voor de bundelpositie meting is, in tegenstelling tot de bundelintensiteit meting, een hoge kwaliteitsfactor nodig om bijdragen van de verschillende TM resonanties te kunnen onderscheiden. In ons systeem zorgt de superpositie van de TM₀₁₀- en TM₁₁₀-modi ervoor dat de signalen van de twee diametraal tegenover elkaar geplaatste trilholtes bij een gegeven afwijking van de bundelpositie, verschillende signaalniveaus hebben. Dit is niet het geval in een conventionele cilindrische trilholte. Dit is belangrijk omdat hiermee het teken van de positieafwijking kan worden bepaald, waarvoor anders fase-informatie uit een afzonderlijke trilholte nodig zouden zijn.

Met behulp van ANSYS HFSS is onderzocht hoe de verschillende geometrische en elektrische parameters van de trilholtes de meetgevoeligheid beïnvloeden. De onderzochte parameters zijn de azimuthale afstand tussen de individuele trilholtes; de afstand tussen de gearde buitenmantel en de trilholtes, de breedte en dikte van het diëlektricum en de afmeting van de uitkoppellus. Het criterium voor de keuze van de configuratie is de maximaal uitgekoppelde signaalgrootte

van de TM10 resonantie bij 145.7 MHz. Hieruit is afgeleid, dat het in Figuur 3 afgebeelde systeem de best mogelijke meetgevoeligheid heeft. Bij excitatie met een sinusoidaal signaal van 145.7 MHz (de tweede harmonische) met een amplitude van 1 nA en een 2 mm verschuiving van de bundelpositie, is het uitgangssignaal volgens de ANSYS HFSS simulaties 20.5 nV, terwijl een analytische benadering 25 nV oplevert. Op basis van deze goede overeenstemming is een prototype gebouwd.



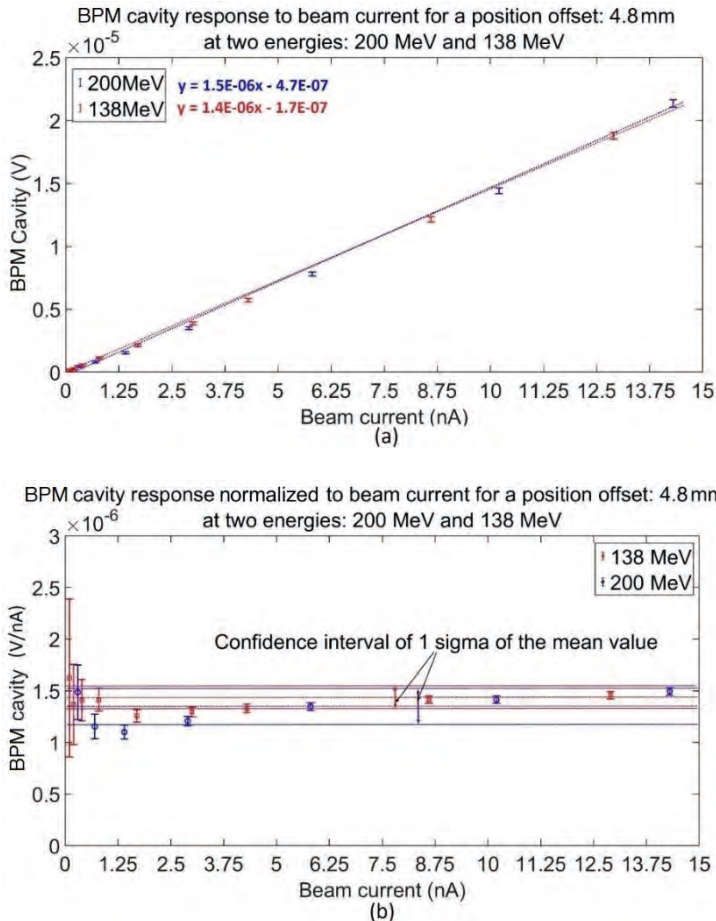
Figuur 3: 3D weergave en dwarsdoorsnede van de prototype bundelpositie monitor met relevante afmetingen.

Het prototype van de bundelpositie monitor is, net als het prototype van de bundelstroom monitor, eerst gekarakteriseerd op een testbank door de S-parameters (frequentie afhankelijkheid van de koppelingssterkten) te meten. De resonantiefrequentie van de TM010 mode voor alle vier trilholtes kwamen goed overeen. De gevoeligheid van de positiemeting bleek echter sterk afhankelijk te zijn van RF stoorsignalen, misaanpassing van de impedanties en kleine geometrische verschillen tussen de trilholtes. Verdere ANSYS HFSS simulaties waarbij geometrische verschillen (verschuiving en draaiing van de trilholte en verschuiving van het diëlektricum) in het model werden geïntroduceerd bevestigden de experimentele waarnemingen. Voor een verbeterde versie van het prototype week het gemeten uitgangssignaal voor de nominale bundelpositie minder dan 5% af van de simulatie; voor bundelpositie afwijking van 15 mm was het verschil tussen meting en simulatie 16%.

Het prototype is vervolgens geïnstalleerd in de bundellijn op een afstand van 6 meter van de uitgang van de degrader. Hierdoor is de toename van de tijdsduur van de bundelpakketjes ten gevolge van de energiestreiding en daarmee de vermindering van de amplitude van de tweede harmonische component, veel

kleiner dan bij de metingen aan de bundelintensiteit monitor. Met de bundelpositie monitor zijn twee typen metingen uitgevoerd: variatie van de bundelintensiteit voor een gegeven afwijking van de bundelpositie en variatie van de bundelpositie voor een gegeven bundelintensiteit.

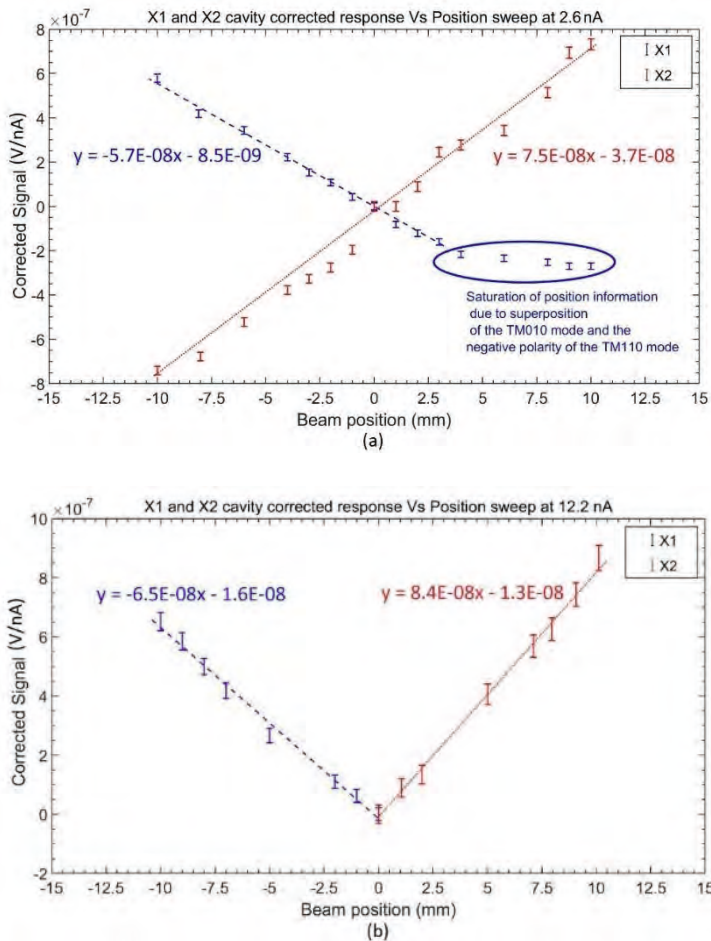
De metingen als functie van de bundelintensiteit, uitgevoerd bij bundelenergieën 138 MeV en 200 MeV, bevestigden de lineaire respons van het prototype als functie van de bundelintensiteit (Figuur 4 (a)). De respons na aftrek van het signaal zonder bundel (cyclotron RF-interferentie) en genormaliseerd op bundelintensiteit, is vrijwel onafhankelijk van de bundelintensiteit voor bundelintensiteiten groter dan 2.5 nA (Figuur 4 (b)). Voor bundelintensiteiten kleiner dan 2,5 nA wijkt de genormaliseerde respons af en heeft een aanzienlijke onzekerheid.



Figuur 4: (a) Respons van de X1 trilholte na correctie voor de respons zonder bundel voor 200 MeV en 138 MeV protonenbundels bij een bundelpositie afwijking van 4,8 mm in de richting van de X1 trilholte. (b) Respons genormaliseerd op de bundelstroom. De foutengrens van individuele meetpunten in beide grafieken corresponderen met tweemaal de standaarddeviatie.

De positiegevoeligheid van beide trilholtes in het horizontale vlak (X1 en X2) is bij een bundelenergie van 138 MeV gemeten over een bereik van +/-10 mm ten opzichte van de nominale bundelpositie (Figuur 5). Voor de X1-trilholte is de respons lineair over het bereik -10 mm tot +3 mm; voor de X2-trilholte over een groter bereik -10 mm tot +10 mm. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk de 30% hogere positiegevoeligheid in vergelijking met trilholte X1, wat kan worden toegeschreven aan geometrische asymmetrieën, die onbedoeld zijn geïntroduceerd tijdens het opnieuw in elkaar zetten van het systeem.

De positiegevoeligheid bleek ook enigszins afhankelijk van de bundelintensiteit: bij 12.2 nA is de gevoeligheid 12% hoger dan bij 2.6 nA. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het scalair aftrekken van het signaal zonder bundel. Het totale signaal is echter de vectoriële som van de bijdrage van de TM₀₁₀-modus bij de meetfrequentie en het signaal zonder bundel. Als de meting met een netwerk analyser in plaats van de hier gebruikte spectrum analyser wordt uitgevoerd, kan het signaal zonder bundel vectoriëel worden afgetrokken. Hiermee zou dan de intensiteitsafhankelijkheid van de gevoeligheid moeten verdwijnen. Het scalair aftrekken van het signaal zonder bundel en de fluctuaties in dit signaal beïnvloeden de kwaliteit van de metingen vooral wanneer het product van de bundelstroom en afwijking van de bundel positie $\leq 2.5 \text{ nA mm}$ is. Een meetmethode waarbij het signaal zonder bundel wel vectoriëel kan worden afgetrokken wordt beschreven. De gemeten positieresolutie ligt binnen de 0.5 mm die vereist is voor de PROSCAN-bundellijnen.



Figuur 5: Signaal van de X1 en X2 trilholtte na aftrek van het signaal zonder bundel en normalisatie met de bundelintensiteit versus de positie van de straal (variatie horizontale bundelpositie). De foutengrens van de individuele meetpunten correspondeert met een betrouwbaarheids interval van 95% (\pm twee standaarddeviaties). In figuur (a) zijn de metingen voor een bundelstroom van 2.6 nA weergegeven, in figuur (b) die voor een bundelstroom van 12.2 nA. De bundelstroom en bundelpositie zijn gemeten met een ionizatiekamer met een onzekerheid van 1% en 5% voor bundelstroom respectievelijk bundelpositie.

Een belangrijke waarneming was dat het signaal van een trilholtte in de X-richting niet meer dan 2% veranderde wanneer de bundelpositie in de Y-richting gevarieerd werd in het bereik van ± 10 mm (ten opzichte van de nominale positie). Dit toont aan dat de horizontale polarisatie van de TM110 resonantie niet wordt aangeslagen voor afwijkingen van de bundelpositie in de verticale richting.

Op basis van de metingen en verdere simulaties is een verder verbeterd ontwerp van de bundelpositie monitor gemaakt, met een positiegevoeligheid die een factor 2.4 beter is dan die van de nu geteste versie. Deze verbeterde versie heeft een grotere verhouding tussen dikte en straal van het diëlektricum, een grotere azimuthale breedte van de trilholtes en een hogere externe kwaliteitsfactor door gebruik van aluminumoxide met nog lagere diëlektrische verliezen. Deze verbeteringen zullen binnenkort experimenteel getoetst worden.

Voor- en nadelen van trilholtes voor meting van bundeleigenschappen

De toepassing van trilholtes als instrument voor de meting van bundelintensiteit en bundelpositie heeft zowel voor- als nadelen ten opzichte van de bundeldiagnostiek die nu bij PROSCAN gebruikt wordt. Met trilholtes in plaats van de bestaande interceptieve ionisatiekamers (IC) wordt meervoudige verstrooiing en de vorming van secundaire halo voorkomen. Bovendien hebben de trilholtes, in tegenstelling tot IC's, geen last van verzadiging van het signaal en activatie door de protonenbundel. De trilholtes moeten echter uitgebreid geijkt worden met behulp van andere meettechnieken, vergen een langere signaalintegratietijd om een voldoende signaal-ruis verhouding te bereiken en zijn gevoelig voor stoorsignalen en de excitatie van andere TM-resonanties die de meetgevoeligheid kunnen beïnvloeden.

Rekening houdend met zowel de voor- als nadelen, concluderen we dat de ontwikkelde monitoren op basis van trilholtes een goede rol kunnen spelen als instrument om de veiligheid van de bestralingen bij PROSCAN te bewaken binnen de bestaande behandelings- en bedieningsprocedures.