

Samenvatting (Summary in Dutch)

In circulaire versnellers worden de deeltjesbundels met dipoolmagneten in hun evenwichtsbaan gehouden en met quadropoolmagneten rond deze evenwichtsbaan gefocusseerd. Verhoging van het dipoolveld is essentieel om de botsingsenergie van versnellers te verhogen. Op het CERN is momenteel de Large Hadron Collider (LHC) in de ontwerpfase. De LHC zal ongeveer 1100 supergeleidende dipoolmagneten bevatten met een veldsterkte van 8-9 T en een lengte van 14 m. De platte (of Rutherford) kabels, waarmee de spoelen van deze magneten zijn gewikkeld, bestaan uit getwiste draden (of strands), die zijn opgebouwd uit getwiste supergeleidende filamenten, ingebed in een kopermatrix.

In een versneller worden de dipoolmagneten opgeregeld van het injectieveld, het veld waarbij de deeltjes vanuit een voorversneller worden geïnjecteerd, tot het operationeveld. Als gedurende de werking van de versneller een magneet quencht, d.w.z. zijn supergeleidende eigenschappen verliest, wordt de stroom door deze magneet uitgekoppeld en vervolgens met alle in serie geschakelde magneten snel afgeregeld. Tijdens het op- en afregelen staan de kabels bloot aan een veldvariatie $\dot{B}$, waardoor verschillende typen afschermstromen in de kabel worden geïnduceerd. Centraal in dit proefschrift staat de vraag in welke mate deze stromen de werking van supergeleidende magneten beïnvloeden. Hoewel het onderzoek is toegespitst op de dipoolmagneten ten behoeve van LHC, zijn de resultaten ook toepasbaar op andere typen spoelen die van Rutherford kabels zijn gemaakt. De uitgewerkte modellen zijn tevens geldig voor spoelen die gewonden zijn van andere typen kabels.

De verschillende aspecten van de strand, de kabel en de magneet welke in het algemeen van invloed zijn op de elektrodynamika van de kabel worden besproken. Hierbij wordt ingegaan op de structuur, produktiewijze, veld- en krachtverdeling, kabelconnecties en quenchgedrag van de magneten alsmede de structuur van de kabels en de strands. Vervolgens worden de afschermstromen op strandniveau en kabelniveau behandeld die experimenteel zijn onderzocht aan de hand van metingen aan korte stukken geleider.

In de daarop volgende hoofdstukken wordt de invloed van deze stromen op de werking van versnellerdipoolmagneten onderzocht. Drie aspecten komen hierbij aan de orde: het energieverlies, de veldfouten en de stabiliteit. Deze aspecten worden theoretisch behandeld en zijn experimenteel geëvalueerd voor 11 LHC dipool modelmagneten van zowel 1 m als 10 m lengte.

Stroomverdeling in strands.

- **‘Persistent Currents (PCs)’**. De PCs stromen binnenin de filamenten van de strands en schermen het binnenste gedeelte van de filamenten ten dele af tegen een extern veld. Deze stromen blijven bestaan nadat het externe veld constant geworden is.
- **‘Interfilament Coupling Currents (IFCCs)’**. De IFCCs stromen in de filamenten van de strands en via de normaal-geleidende matrix. Hierbij schermen zij het binnenste gedeelte van de strand af tegen de externe veldverandering. De IFCCs lopen door de filamenten

over een karakteristieke lengte gelijk aan de twistlengte van de filamenten, en zijn omgekeerd evenredig met de resistiviteit van de matrix.

Om de verliezen, veldfouten en stabiliteit in de magneten ten gevolge van de PCs en de IFCCs te quantificeren, zijn deze twee stromen in een aantal strands bepaald door meting van de magnetisatie in een variërend magneetveld. Tevens is nagegaan of de stromen in aanliggende strands van eenzelfde kabel elkaar onderling beïnvloeden

Stroomverdeling in kabels.

In kabels waarin de strands onderling elektrisch contact maken zullen stromen in en tussen de strands van de kabel geïnduceerd worden die het binnenste gedeelte van de kabel ten dele afschermen van de externe veldverandering. Met toenemende botsingsenergie van versnellers nemen tevens de afmetingen van de kabels toe, hetgeen grotere afschermstromen op kabelniveau tot gevolg heeft. De PCs en IFCCs zijn daarentegen vrijwel onafhankelijk van de kabelgeometrie.

De stroomverdeling in de strands van een kabel is berekend met behulp van een computerprogramma waarin de kabel is gemodelleerd middels een elektrisch netwerk van knooppunten verbonden door middel van strand-secties en contactweerstand tussen aanliggende en kruisende strands. Belangrijke verbeteringen vergeleken met bestaande modellen zijn de mogelijkheden om tijdafhankelijk gedrag te onderzoeken en om ongelijkmatige ruimtelijke verdelingen in de kabelparameters en externe factoren op te leggen. De stroomverdeling bestaat uit drie bijdragen:

- **‘Transport Current’**. Deze verschilt per strand wanneer de strands verschillende serieweerstanden hebben, veroorzaakt door inhomogene soldeerverbindingen tussen kabels onderling of tussen kabels en stroomtoevoerdraden.
- **‘Interstrand Coupling Currents (ISCCs)’**. De ISCCs stromen door de contactweerstand en in de strands over een karakteristieke lengte gelijk aan de twistlengte van de strands. Speciale aandacht wordt besteed aan de tijdconstanten van deze koppelstromen voor verschillende kabelconfiguraties, aan lokale verzadiging van de strands en aan de distributies van de ISCCs in geval van variërende contactweerstand en $\dot{B}$ over de kabelbreedte. Contactweerstand kunnen orden van grootte variëren aangezien ze sterk afhangen van o.a. de temperatuurbehandeling, de druk en de oppervlaktecondities van de strand. Een nieuwe meetopstelling is ontwikkeld waarmee de contactweerstand van verscheidene kabels zijn onderzocht als functie van de transversale druk.
- **‘Boundary-induced Coupling Currents (BICCs)’**. Met het netwerk model is het bestaan van dit type koppelstroom aangetoond. BICCs worden geïnduceerd als gevolg van variaties in interne en externe factoren in de lengterichting van de kabel en met name de variaties in de contactweerstand en $\dot{B}$ in en nabij de kabelconnecties en de spoelkoppen. De BICCs onderscheiden zich van de ISCCs door hun veel grotere karakteristieke (lus)lengte, karakteristieke tijd en grootte. De typische stroomverdeling van de BICCs wordt geïllustreerd en relaties worden gegeven die deze verdeling beschrijven als functie van de plaats en de tijd. Een nieuwe meetopstelling is ontworpen waarin een 1.3 m lange rechte kabel is onderworpen aan een lokale veldverandering en plaatselijk is voorzien van lagere contactweerstand. Hiermee is het bestaan van BICCs in één enkele kabel voor het eerst experimenteel aangetoond.

Invloed van de stroomverdeling op de werking van magneten.

- **Energieverlies.** In een versneller zal iedere warmte-ontwikkeling in de magneten uiteindelijk gecompenseerd moeten worden door de cryogene installatie. Naast de bundelverliezen, de warmte-inlek en de resistieve verliezen in de kabelconnecties ontstaat een bijkomend verlies gedurende excitatie. Dit verlies bestaat voornamelijk uit het hystereseverlies inherent aan de PCs en het koppelverlies ten gevolge van de IFCCs in de matrix en de ISCCs en BICCs in de contactweerstand. Elektrische verliesmetingen aan 11 LHC magneten zijn uitgevoerd om de verschillende bijdragen te bepalen en om verschillen tussen de magneten en tussen de vier polen van een magneet te onderzoeken.
- **Veldfouten.** In versneller magneten kunnen veldfouten resulteren in een instabiele deeltjesbeweging en dientengevolge in hogere bundelverliezen en een lagere luminositeit. In dit proefschrift gaat de aandacht voornamelijk uit naar de veldfouten die door de koppelstromen veroorzaakt worden. Het veld als gevolg van de IFCCs is verwaarloosbaar is ten opzichte van de velden veroorzaakt door de ISCCs en de BICCs. De ISCCs genereren velden die vrijwel constant zijn over de lengterichting (z) van de magneet en waarvan de multipoolcomponenten afhangen van de grootte en de verdeling van R_c over de dwarsdoorsnede van de spoel. De BICCs resulteren in veldfouten die sinusvormig variëren over de lengte van de magneet. De door de koppelstromen gegenereerde velden zijn in de boring van een viertal LHC magneten gemeten. De verschillende veldcomponenten zijn gescheiden na evaluatie van de tijdconstanten en de $\dot{B}$ - en z -afhankelijkheden van de stromen.
- **Stabiliteit van de geleider.** Temperatuurstijgingen van de kabel en lokaal hogere stromen dan gemiddeld resulteren in een kleinere marge tussen de lokale stroom en de kritieke stroom. Dit betekent dat de stabiliteit van de geleider afneemt zodat kortstondige externe warmtepulsen eerder tot een quench kunnen leiden. De afname van de stabiliteit ten gevolge van de koppelstromen is onderzocht aan de hand van de reductie van de quenchstroom als functie van $\dot{B}$. In combinatie met de resultaten van de verliesmetingen is de temperatuur van de kabel als functie van het koppelverlies berekend. Tevens is de effectieve warmteoverdracht tussen de kabel en het helium bepaald en is de te verwachten temperatuurstijging van de kabel ten gevolge van bundelverliezen afgeschat.

In het afsluitende hoofdstuk worden de mogelijkheden van het modelleren van stroomverdelingen in kabels met behulp van een netwerk model kort besproken en worden de restricties ten aanzien van de contactweerstand samengevat. Het specificeren van een minimale waarde van de gemiddelde contactweerstand in de kabels is vereist om grote verliezen en veldfouten ten gevolge van de koppelstromen te vermijden. Tevens moeten de contactweerstand zo constant mogelijk zijn over de dwarsdoorsnede van de spoelen en over alle magneten in de versneller om:

- lokale vermindering van de stabiliteit (als gevolg van de ISCCs en BICCs) zo veel mogelijk te voorkomen,
- de veldcorrectie (als gevolg van de ISCCs en BICCs) te vereenvoudigen.