



(12) PATENT

(19) NO

(11) 337384

(13) B1

NORGE

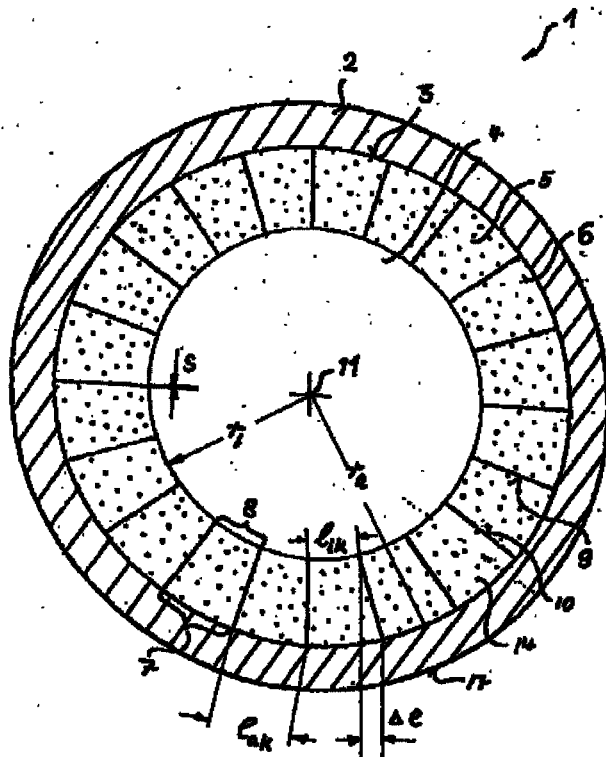
(51) Int Cl.

H01B 12/10 (2006.01)
H01B 12/12 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20065373	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr	2005.04.22 PCT/EP2005/04420
(22)	Inng.dag	2006.11.22	(85)	Videreføringsdag	2006.11.22
(24)	Løpedag	2005.04.22	(30)	Prioritet	2004.04.23, EP, 04009730
(41)	Alm.tilgj	2007.01.22			
(45)	Meddelt	2016.04.04			
(73)	Innehaver	GES für Schwerionenforschung mbH, Planckstrasse 1, DE-64291 DARMSTADT, Tyskland			
(72)	Oppfinner	Egbert Fischer, c/o GES für Schwerionenforschung mbH, Planckstrasse 1, DE-64291 DARMSTADT, Tyskland Hamlet Khodghibagiyan, Bogolyubov Avenue 6, Apart. 1407, Dubna, RU-141980 MOSKVA, Russland Alexander Kovalenko, Moskovskaja Strasse 12, Apart. 60, Dubna, RU-141980 MOSKVA, Russland Gebhard Moritz, c/o GES für Schwerionenforschung mbH, Planckstrasse 1, DE-64291 DARMSTADT, Tyskland			
(74)	Fullmektig	Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge			
(54)	Benevnelse	Superledende kabel, samt fremgangsmåte for produksjon derav			
(56)	Anførte publikasjoner	Ingen			
(57)	Sammendrag				

Oppfinnelsen vedrører en superledende hul kabel og en fremgangsmåte for fremstilling av denne. Den superledende hule kabelen (1) har et ytre rør (2) som har et sirkulært indre tverrsnitt og en sylindrisk innervegg (3). I tillegg har den superledende hule kabelen (1) en sentral kjølekanal (4) med et polygonalt eller sirkulært tverrsnitt som imidlertid er mindre enn det indre tverrsnittet til det ytre røret (2). Anordnet mellom det ytre røret (2) og kjølekanalen (4) er profilerte superledende tråder (5). Disse profilerte superledende trådene (5) har en tverrsnittsprofil som svarer til en sluttstein som kjent fra romerske steinbruer eller korshvelv. For det formålet har tverrsnittsprofilen minst et ytre krumningsområde (7) og et indre krumningsområde (8), hvor det ytre krumningsområde (7) er tilpasset den indre radien til det ytre røret (2), og det indre krumningsområde (8) er tilpasset til kjølekanalen (4). Sidekantene (12, 13) kan også være profilert enten rettlinjert mot midtpunktet (11) av kjølekanalen (4), eller ved hjelp av en forskyvning fra den rette linjen.



Oppfinnelsen gjelder en superledende hul kabel med et ytre rør med et sirkulært indre tverrsnitt, og, en sylindrisk innervegg. I tillegg har den superledende hule kablen en sentral kjølekanal med sirkulært tverrsnitt som er mindre enn det indre tverrsnittet av det ytre røret. Arrangert mellom innerveggen til det ytre røret og kjølekanalen er profilerte superledende tråder. Slike profilerte superledende tråder omfatter minst én superleder (superledende filament) og har en tverrsnittsprofil som en sluttstein som er kjent fra romerske steinbruer eller korsvelv.

Profilerte superledende kabler, som har en tverrsnittsprofil som en sluttstein, er kjent fra publikasjonen US 6,675,623 B2. Ytterligere kjent teknikk er US 2003/0024 730. De kjente sluttsteinformede superledende kablene består av superledende tråder med rundt tverrsnitt som er snodd sammen med hverandre, og etter snoing er de gitt en trapesform ved hjelp av profileringsvalser.

Strukturen til en superledende hul kabel av Nuclotron-typen som har runde (standardvariant, fig. 16) eller profilerte (forbedret Nuclotron-kabel, fig. 17) superledende tråder er kjent fra publikasjonen "design and test of new hollow high current NbTi-kabel for hurtig stigende synkrone magneter", Proc. EUCAS 2003, Sorrento, september 2003, H. Khodzhbagiyan mfl. I tilfelle med den kjente hule lederen er først en kjølekanal dannet ved hjelp av å tilveiebringe et kompakt, indre metallrør av CuNi. Superledende tråder profilert i den langsgående retningen og med et sluttsteinformet tverrsnitt er plassert på eller viklet på den ytre veggen av det indre røret. For å feste de superledende trådene på det kompakte indre røret, blir NiCr-tråder viklet omkring utsiden av de superledende trådene radially eller i et spiralarrangement. En Kapton-tape viklet over NiCr-trådene danner en ytre beskyttelseskappe. En fiberglasstape, viklet omkring den ytre kappen sikrer at den superledende, hule kablen er elektrisk isolert.

En superledende hul kabel som er strukturert på denne måten, har blant annet den fordel at den er i stand til å kompensere for høye dynamiske belastninger som inntreffer som et resultat av Lorentz-krefter i hurtigpulsede magneter og høye magnetiske felter. Varmekildene som tilveiebringes av disse pulserende feltene ved hjelp av virvelstrømmer, hysterese-sykluser, mekaniske spenningsfelter og andre ytre påvirkninger (f.eks. ionestråler) kan ved kontinuerlig drift avkjøles meget effektivt ved hjelp av den indre kjølekanalen på grunn av det kompakte indre røret. Det forholdsvis store tverrsnittet til det kompakte indre røret som har

en glatt overflate, muliggjør høy gjennomstrømning av kjølemiddel med lav friksjonsmotstand, og følgelig et lavt trykkfall i tofase-heliumstrømmen. I tillegg er alle de superledende trådene arrangert absolutt symmetrisk og er følgelig under identiske driftsbetingelser, og følgelig blir forringelse av den kritiske strømmen til kabelen med økende elektromagnetisk belastning, unngått i meget stor grad.

Dette arrangementet av de superledende trådene resulterer videre i lav kabelinduktivitet og følgelig (blant annet) også i reduksjon av den lagrede energien.

En annen kabeltype blir vanligvis foretrukket når kjølesystemet som skal produseres, ikke er ment å bli operert i et uhyre hurtigpulset regime, men i stedet må lagre en stor mengde induktiv energi som må leveres i høye stokastiske varmpulser av kort varighet. I det tilfelle er en kontinuerlig høy kjøleytelse av sekundær betydning, mens hurtigst mulig varmeoverføring til varmekapasiteten til heliumet som kjøler de superledende trådene i millisekundområdet, primært blir søkt. For dette formålet ble de kjente hule kablene av CICC-typen som er vist på fig. 14, utviklet.

Fordi disse kablene også i økende grad må overvinne høyere mekaniske og termiske belastninger ved praktisk bruk, resulterte imidlertid ytterligere utvikling av disse i en høystrømskabel av CICC-typen som et resultat av ytterligere konstruksjonsmessige elementer, har komplisert avkjøling med to grunnleggende forskjellige kjølekretser med superkritisk helium i den ytre kjølekretsen og med tofase-helium i den sentrale kjølekanalen.

Den kompliserte strukturen har ikke bare tekniske, og dermed kostnadspåvirkende ulemper, men gir også automatisk opphav til en redusert gjennomsnittlig strømtetthet i den hule kabelen. En kabel av en slik type i samsvar med teknikkens stand, er vist på fig. 15 og er kjent som en POLO-kabel (se f.eks. "CHATS", FzK, Karlsruhe, september 2002, L. Bottura mfl.). Den representerer startpunktet for den oppfinnelsen som blir forklart nedenfor.

Problemet i følge oppfinnelsen er å overvinne ulempene ved den kjente teknikk og tilveiebringe en superledende hul kabel som muliggjør intensiv kjøling av de superledende komponentene, og som i tillegg gjør tilgjengelig en høy strømtetthet for en hul kabel av CICC-typen med en kompakt og mekanisk stabil struktur for den hule kabelen. Løsninger skal tilveiebringes med hensyn til hvordan ulemp-

ene ved CICC-kabelen med hensyn til kabelen av Nuclotron-typen kan overvinnes i meget stor grad og hvordan fordelene ved begge de hule kabeltypene kan være, så langt som mulig, i en ny superledende hul kabel.

5 Problemet blir løst ved hjelp av de trekk som er angitt i de uavhengige patentkravene. Fordelaktige utviklinger fremgår av de avhengige kravene.

I samsvar med oppfinnelsen er det tilveiebrakt en hul kabel som har et ytre rør med et sirkulært indre tverrsnitt og en sylindrisk innervegg. I midten av den superledende hule kabelen er det anordnet en sentral kjølekanal med et polygo-

10 nalt eller sirkulært tverrsnitt som er mindre enn det indre tverrsnittet til det ytre røret. Anordnet mellom innerveggen og kjølekanalen er profilerte superledende tråder. Disse profilerte superledende trådene har minst ett superledende filament (vanligvis i en Cu-matriks). De superledende trådene har videre en tverrsnittsprofil som en sluttstein.

Tverrsnittsprofilen til de profilerte, superledende trådene har et ytre krumningsområde som er tilpasset det sirkulære indre tverrsnittet til det ytre røret.

15 Tverrsnittet av de profilerte superledende trådene har videre et indre krumningsområde som igjen er tilpasset det sirkulære tverrsnittet til kjølekanalen. Tverrsnittsprofilen har til slutt sidekanter som er orientert profilert mot midtpunktet av kjølekanalen. De profilerte superledende trådene er følgelig anordnet på innerveggen til

20 det ytre røret, og deres indre områder danner kjølekanalen i den superledende hule kabelen.

Som en oppsummering kan det nevnes at den superledende kabelen har tre hovedelementer med følgende fordeler. For det første er de superledende elementene minimalisert, og som et resultat av dette er Meissner-effekten og vekselstrømstapene minimalisert.

25 For det andre, ettersom et stort antall filamenter som mulig er innbakt i en metallmatriks som mekanisk stabiliserer filamentene og sikrer en høy grad av varmeledning. For det tredje er et antall superledende tråder kombinert og mekanisk stabilisert i den superledende kabelen og i kontakt med kjølemiddel er frembrakt. Elektrisk isolert fra hverandre danner de superledende

30 trådene i henhold til oppfinnelsen, med en resistansbarriere, det grunnleggende materiale for frembringelse av aktuelle spoleelementer. Fordi trådene ikke er sammensmeltet med hverandre, er spolene og/eller kablene uhyre fleksible.

En slik superledende hul kabel i følge oppfinnelsen har blant annet, følgende fordeler:

De profilerte superledende trådene er arrangert så tett mot hverandre og tilpasset den indre veggen i det ytre røret at de kan holde seg på plass ved hjelp av en formbasert og kraftbasert pasning uten det indre røret som er kjent fra teknikkens stand, og de resulterer i et sylindrisk legeme som danner kjølekanalen. Dette vil si at de indre strukturelementene ikke lenger er nødvendige for mekanisk å holde de superledende rådene på plass. I tillegg til materialbesparelsen, som er et resultat av å sløyfe en komponent, har denne superledende hule kanalen videre den fordel at det større tverrsnittet av kjølekanalen medfører en reduksjon i motstand mot strømming av kjølemiddelet. En større effekt kan følgelig oppnås. Alternativt kan det ytterligere frie volumet også benyttes til større superledende tråder, og følgelig med en høyere gjennomsnittlig strømtetthet. Kjølemediet eller kjølekanalen er til slutt i direkte kontakt med de profilerte superledende trådene. Selv om denne kontakten også er tilstede i de ovenfor beskrevne CICC-kanalene, er strømningsmotstanden i kjøletrådene betydelig og varmekapasiteten til den lille mengden med superkritisk helium er begrenset slik at kjøleeffektene som kan oppnås med den hule kabelen ifølge oppfinnelsen, er meget større i alle tidsintervaller (korte varmpulser og kontinuerlig lasting). Det symmetriske arrangementet av alle superledende tråder sikrer at kabelen som en helhet har ytterligere stabilitet mot termiske pulser, som beskrevet ovenfor i forbindelse med Nuclotron-kabelen. Fra det kryotekniske synspunkt utgjør den nå dramatisk forenklede avkjølingen, sammenlignet med startpunktet, en ubetinget fordel fordi dette betyr at to kjølekretser, og to virkelig kvalitativt forskjellige kjølekretser, nå ikke lenger er nødvendig, og kjølingsytelsen er forbedret med størrelsesordener i alle tidsskalaer (pulsoperasjon i forhold til konstant kontinuerlig operasjon).

De profilerte superledende trådene er anordnet så tett på innerveggen av det ytre røret til den superledende hule kabelen ved hjelp av deres ytre krumningsområder og med deres radialt orienterte sidekanter tilstøtende hverandre, at alle operative temperaturer for den superledede hule kabelen opprettholder en sentral avkjølingskanal med sine indre krumningsområder. Fordi en slik superledende hul kabel blir utsatt for ekstreme temperaturdifferanser fra romtemperatur til noen få grader Kelvin under sin drift, betyr den tette strukturen av de sluttsteinformede,

profilerte superledende trådene at den sentrale kjølekanalen blir opprettholdt til tross for de forskjellige driftstemperaturene. For dette formål er summen av gapbredder som eventuelt dannes mellom de profilerte superlederne under drift, ved alle driftstemperaturer for den superledende hule kabelen, mindre enn differansen i lengde mellom de ytre og indre krumningsområdene for en individuell, profilert superleder. I denne forbindelse,

$$\Delta l = 2\pi(r_a - r_i)/n,$$

hvor n er antall profilerte superledere fordelt på den indre veggen av det ytre røret, r_a er den indre radien til det ytre røret og r_i er den indre radien av strømningskanalen. Fordi lengden l_{ak} med en ytre krumningsradius er

$$l_{ak} = 2\pi r_a/n$$

15

og lengden l_{ik} av det indre krumningsområde for en profilert superleder er

$$l_{ik} = 2\pi r_i,$$

20 hvor følgende betingelser må tilfredsstilles ved alle driftstemperaturer for den superledende hule kabelen:

$$n \cdot s < \Delta l \text{ eller}$$

$$n \cdot s < l_{ak} - l_{ik}$$

25

og følgelig må den betingelsen oppfylles som er

$$s < 2\pi(r_a - r_i)/n^2,$$

30 slik at den sentrale kjølekanalen blir opprettholdt. Antallet profilerte superledende tråder er følgelig avhengig av fremstillingstoleransen og må om nødvendig holdes så liten som mulig for at den resulterende gapbredden kan tillates i tilfelle av store toleranser. For å redusere innvirkningen av virvelstrømmer, bør de to hoveddimensjonene til tverrsnittet av de profilerte superledende trådene ikke være for forskjel-

lig fra hverandre. Den likeledes uønskede varmeproduksjonen som skyldes mekaniske spenninger og deformasjonsfelter, kan minimaliseres ved hjelp av fremstilling med en formbasert pasning, hvor det stemmer med forspenningen.

I en ytterligere utførelsesform av oppfinnelsen har de profilerte superledende trådene maskede, profilerte sidekanter. Selv om observasjonene ovenfor er gitt og utledet for dannelse av en sentral kjølekanal fra profilerte superledere med rettlinjede sidekanter i tverrsnittet av de profilerte superlederne, peker sidekantene inn mot sentrum av den hule kabelen, og en ytterligere mulighet er tilveiebrakt ved hjelp av denne ytterligere utførelsesformen av oppfinnelsen, hvor sidekantene også er profilert og ikke strekker seg i en rett linje mot midtpunktet, for å øke sikkerhetsmarginen for å opprettholde den sentrale kjølekanalen, spesielt som, i tillegg til ovennevnte lengdedifferanse Δl for summen $s \cdot n$ av alle gapbredder, kommer forskyvningen som skyldes de profilerte sidekantene også i betraktning. Som en betingelse for den tillatte gapbredden s , resulterer denne forskyvning, av en størrelse v , i verdien

$$s < (\Delta l + v)/n.$$

De vedføyde figurene 2 og 4 viser to utførelsesformer av profilerte, superledere med profilerte sidekanter og den respektive forskyvningen av størrelse v .

I en ytterligere utførelsesform av oppfinnelsen består det ytre røret av to lag. Et første lag omfatter én eller flere strammetråder viklet i et spiralarrangement omkring en bunt med superledende, profilerte tråder. Et annet lag omfatter et elektrisk isolerende og hermetisk tettende, ytre lag. Denne strammetrådløsningen har den fordel at de superledende hule kablene av enhver ønsket lengde kan produseres kontinuerlig.

I en ytterligere utførelsesform av oppfinnelsen omfatter de profilerte superledende trådene snodde eller vridde superledende filamenter. Eksempler på utførelsesformer av slike profilerte superledende tråder er vist på figurene 6, 7 og 8, og blir forklart senere. De superledende filamentene er forsynt med en ettergivende metallkjerne og en ettergivende metallkappe slik at de superledende trådene er tilgjengelige for profileringsforming. For dette formålet omfatter de profilerte superledende trådene metallmatriks, som har en metallkjerne eller et metallsenter,

vanligvis av Cu) og, for å redusere virvelstrømmer, eventuelt ytterligere mellomliggende lag med høy resistans, f.eks. CuNi-legeringer. De superledende filamentene består f.eks. av NbTi-tråder, som er snodd eller vridt med hverandre. Kappen omfatter likeledes fortrinnsvis en CuNi-legering.

5 I en ytterligere utførelsesform av oppfinnelsen er de profilerte superledende trådene keramiske eller høytemperatur-superledere. Slike HTSC'er har den fordel at deres kritiske temperatur er betydelig høyere enn i tilfelle med metalliske superledere. Den kritiske temperaturen i tilfelle av metalliske superledere er under 20 Kelvin med HTSC'ene er de kritiske temperaturene i noen tilfeller over 10 80 Kelvin, og dette har samtidig den fordel at betydelig billigere kjølemidler kan brukes, eller høyere magnetfelter kan oppnås ved lavere temperaturer. Selv om fremstillingen av HTSC'er til profilerte superledende tråder er vanskeligere, kan det likevel forutses at de såkalt YBCO-baserte keramiske superlederne basert på Y_3O_3 , $BaCO_3$ og CuO med tilsetninger av sølvoksid, platinaoksid eller ceriumoksid 15 helt sikkert kan bearbeides til profilerte superledende tråder ved hjelp av passende smelte- og glødings-prosesser. Selv de såkalte BSCCO-superlederne som består av bismutoksider, strontiumoksider, kalsiumoksider og kobberoksider og kan omfatte tilsetninger av blyoksider, omfatter opp til 90% superledende ortorombisk materiale som kan bearbeides til profilerte superledende tråder.

20 Det ytre røret i den superledende hule kabelen er laget av et metallisk eller ikke-metallisk materiale slik som en CuNi-legering, rustfritt stål, GFRP eller organisk materiale og kan ha en sirkulær kvadratisk eller trapesformet ytre kontur eller enhver annen form som er nødvendig. Det ytre røret kan være viklet med passende Kapton-bånd og/eller fiberglassbånd for elektrisk isolasjon. Den kvadratiske 25 ytre konturen har den fordel at kjølekanalene kan være inkorporert i det ytre røret i den langsgående retningen slik at ikke bare de profilerte sluttsteinformede superledende trådene avkjøles av den sentrale kjølekanalen, som er i direkte kontakt med superlederne, men også kan de i tillegg avkjøles ved hjelp av det ytre røret eller kjølekanalen som løper gjennom det ytre røret i langsgående retning. Det 30 samme gjelder også for trapesformede ytre konturer fordi fire ytterligere kjølekanaler i dette tilfelle også, f.eks. kan være tilveiebrakt direkte i det ytre rørmaterialet. De ytre kjølekanalene kan være åpne langs den indre veggen av det ytre røret over en endelig bredde $\sim l_{ak}$.

De snodde, profilerte superledende trådene krysser disse kanalene med en vinkel som ikke er for spiss, og etter hver kvart vridning av den spiralformede forskyvningen i tillegg avkjølt fra utsiden i direkte kontakt med kjølemiddelet. Følgelig blir alle trådene i denne varianten utsatt for identiske elektromagnetiske, mekaniske og termiske tilstander.

Avhengig av fremstillingsteknologien (med eller uten mekanisk forspenning) og bruksforholdene, er det mulig å tilveiebringe, som materialet for det ytre røret, et materiale som har en høyere eller lavere termisk utvidelseskoeffisient enn materialet i de profilerte, superledende trådene. Hvor det passer, blir egenskapene til materialet i det ytre røret også tilpasset egenskapene til det superledende materiale for å sikre at formen og integriteten til den sentrale kjølekanalen blir bevart. Et ytterligere viktig materialvalgkriterium for det ytre røret er høy elektrisk resistans mot virvelstrømmer, mens det har tilstrekkelig mekanisk styrke.

Fremgangsmåter for fremstilling av en superledende hul kabel kan omfatte et antall fremgangsmåte-trinn i forskjellig rekkefølge. Fremgangsmåten for å fremstille en superledende hul kabel ifølge oppfinnelsen, er videre også avhengig av mulighetene for fremstilling av profilerte superledende tråder.

En av fremgangsmåtene i henhold til oppfinnelsen for å fremstille en superledende hul kabel, omfatter følgende trinn. Først blir det fremstilt et kompakt, ytre rør med et sirkulært indre tverrsnitt og en sylindrisk innervegg som er så glatt som mulig. Bortsett fra dette blir det tilveiebrakt profilerte, superledende tråder med en tverrsnittsprofil som en sluttstein, som kjent fra romerske steinbruer eller steinvelv, fremstilt. For formålet har tverrsnittsprofilen til de profilerte, superledende trådene et ytre krumningsområde som er tilpasset det sirkulære, indre tverrsnittet av det ytre røret. Videre har tverrsnittsprofilen et indre krumningsområde som er tilpasset det sirkulære tverrsnittet av kjølekanalen. Endelig har tverrsnittsprofilen sidekanter som er orientert profilert mot midtpunktet av en kjølekanal som skal dannes.

Etter at de to hovedkomponentene i den hule kabelen, i henhold til oppfinnelsen er blitt fremstilt, blir de profilerte superledende trådene først brakt sammen for å danne en langsgående, utvidet sirkulær bunt omkring en sentral kjølekanal. I løpet av sammenføringen kan hjelpemidler slik som klebesubstanser også brukes for å sikre en materialbasert forbindelse mellom de profilerte superledende trådene. Den sirkulære bunten som omfatter profilerte, superledende tråder, blir så

trukket inn i kontakt med det ytre røret i den superledende hule kabelen. Denne fremgangsmåten har den fordel at den hule kabelen kan sammenstilles fra to komponenter som kan produseres uavhengig av hverandre.

5 Ifølge en ytterligere variant av fremgangsmåten blir røret ikke produsert i form av en kompakt komponent, men blir i stedet fabrikkert i to halvskall. Ved sammenstilling av den superledende hule kabelen blir de fremstilte, profilerte superledende trådene så plassert inne i halvskallene. Halvskallene blir deretter ført sammen med profilerte superledere liggende inne i og sveiset sammen. Denne fremgangsmåten har den fordel at etter sveiseprosessen, kan sammentrekning av det 10 ytre røret inntreffe, noe som samtidig frembringer komprimerende sammenpakning av de profilerte superledende trådene som ligger inni.

I en ytterligere fremgangsmåtevariant er strammetråder viklet i et spiralarrangement omkring en bunt med profilerte superledende tråder, fortrinnsvis mot snoingsretningen til de superledende trådene. Et elektrisk isolerende og hermetisk 15 tettende ytre lag blir deretter påført over strammetrådene. Denne fremgangsmåtevarianten har den fordel at ubegrenset lange superledende hule kabler kan omfatte profilerte superledende tråder, kan produseres kontinuerlig.

En ytterligere fremgangsmåtevariant tilveiebringer muligheten for å varme opp det ytre røret i form av en kompakt komponent og avkjøle en bunt med 20 profilerte, superledende tråder som har en sentral kjølekanal. De to komponentene blir så skjøvet inn i hverandre. Deretter krympes det ytre røret på den sirkulære bunten med langsgående profilerte, superledende tråder, og får de superledende trådene til å bli presset mot hverandre mens det dannes en sentral kjølekanal. Denne fremgangsmåten har den fordel at inntrekking av den sirkulære profilen av 25 de superledende trådene som har en sentral kjølekanal i det kompakte ytre røret, blir gjort lettere. I denne forbindelse er det også mulig for at bare det solid konstruerte ytre røret blir oppvarmet, eller at bare bunten med profilerte superledende tråder blir avkjølt.

En foretrukket fremgangsmåte for å fremstille profilerte superledende tråder 30 omfatter følgende fremgangsmåte-trinn. I den vanlige fremgangsmåten blir først superledende multifilamenttråder med rundt tverrsnitt fremstilt, som i samsvar med de tilsiktede bruksforholdene har en optimal mikrostruktur som passer med ytterligere resistive barrierer. Deretter blir de runde superledende trådene profilert for å

danne profilerte superledende tråder. Profileringen kan utføres på en lang rekke forskjellige måter.

På den ene side er det mulig å bruke passende profilvalser som frembringer det indre krumningsområde og det ytre krumningsområde så vel som sluttstein-
 5 formen til sideflatene. Det er videre også mulig å bruke profilvalser for sidekantene for å tilveiebringe en forskyvning i sidekantene slik at de profilerte superledende trådene griper inn i hverandre i større utstrekning ved montering til en bunt som har en sentral kjølekanal. I stedet for profilerte valser, er det også mulig å tilveiebringe profiltrekking gjennom en passende profilblokk, gjennom hvilken den prepa-
 10 rerte tråden blir trukket og ved hjelp av hvilken, i prosessen, formen av tverrsnittprofilen blir modifisert. En ytterligere mulighet ligger i såkalt omformingssmiing hvor den ønskede profilen blir tilveiebrakt ved hjelp av passende smiprosedyrer.

I stedet for et solid konstruert ytre rør kan innpakking av de profilerte superledende trådene også utføres ved å bruke en spiralviklet stramningstråd, f.eks.
 15 laget av NiCr, fig. 13: det elektrisk isolerende, hermetisk tette ytre lag blir deretter fremstilt ved f.eks. polymerisering.

I samsvar med en utførelsesform av oppfinnelsen angår denne følgende en superledende hul kabel med følgende trekk:

et ytre rør 2 med et sirkulært indre tverrsnitt og en sylindrisk innervegg 3;
 20 en sentral kjølekanal 4 med et polygonalt eller sirkulært tverrsnitt som er mindre enn det indre tverrsnittet av det ytre røret 2, hvor det mellom innerveggen 3 og kjølekanalen 4 er anordnet profilerte superledende tråder 5;

de profilerte superledende trådene 5, som omfatter minst et superledende filament 6 og som har en tverrsnittprofil som en sluttstein som kjent fra romerske
 25 steinbroer eller korsvelv, karakterisert ved at tverrsnittprofilen til de profilerte superledende trådene 5 har et ytre område 7 med krumning som er tilpasset det polygonale eller sirkulære indre tverrsnittet til det ytre røret 2 og et indre område 8 med krumning som er tilpasset det sirkulære tverrsnittet av kjølekanalen 4, og tverrsnittprofilen har sidekanter 9, 10 som er orientert profilert mot midtpunktet 11
 30 til kjølekanalen 4, idet de profilerte superledende trådene 5 er anordnet på den indre veggen 3 av det ytre røret 2, og de indre områdene 8 av de profilerte superledende trådene 5 danner kjølekanalen 4 til den superledende hule kabelen 1.

Den superledende hule kabelen kan være kjennetegnet ved at de profilerte superledende trådene 5 er anordnet så stramt på innerveggen 3 til det ytre røret 2 i den superledende hule kabelen 1 ved hjelp av deres ytre krumningsområder 7 og med deres radialt orienterte sidekanter 9, 10 ved siden av hverandre, at de opprettholder en sentral kjølekanal 4 med sine indre krumningsområder 8 ved alle driftstemperaturer for den superledende hule kabelen.

Denne superledende hule kabelen kan være kjennetegnet ved at summen av gapbreddene (s) av eventuelle radiale gapformasjoner mellom de profilerte superledende trådene 5 ved alle driftstemperaturer av den superledende hule kabelen 1 er mindre enn differansen i lengde (Δl) mellom de ytre 7 og indre 8 krumningsområdene for en individuell profilert superledende tråd.

Den superledende hule kabelen kan videre være kjennetegnet ved at de profilerte superledende trådene 5 har innbyrdes sammenpassende profilerte sidekanter 12, 13.

Videre kan den superledende hule kabelen være kjennetegnet ved at de profilerte superledende trådene 5 har spesielle overflatebelegg eller delvis kappemidler med høy resistans for å redusere virvelstrømeffektene og termiske tap.

Den superledende hule kabelen kan videre være kjennetegnet ved at de profilerte superledende trådene 5 er snodd omkring den sentrale kjølekanalen.

Den superledende hule kabelen kan videre være kjennetegnet ved at de profilerte superledende trådene 5 har keramiske superledere eller høytemperatursuperledere.

Den superledende hule kabelen kan videre være kjennetegnet ved at det ytre røret 2 har en sirkulær, kvadratisk eller trapesformet ytre kontur 17.

Den superledende hule kabelen kan videre være kjennetegnet ved at det ytre røret 2 omfatter kjølekanaler 18 i sin langsgående retning.

Den superledende hule kabelen kan videre være kjennetegnet ved at den termiske utvidelseskoeffisienten til materialet i et kompakt ytre rør 2 er større enn den termiske utvidelseskoeffisienten til de profilerte superlederne 5.

I samsvar med en ytterligere utførelsesform angår oppfinnelsen også en fremgangsmåte for å produsere en superledende hul kabel 1, som omfatter følgende trinn:

å produsere et ytre rør 2 med et sirkulært indre tverrsnitt og en sylindrisk innervegg 3;

å produsere profilerte superledende tråder 5 med en tverrsnittsprofil som en sluttstein som kjent fra romerske steinbroer eller korsveiv, hvor tverrsnittsprofilen til de profilerte superledende trådene 5 har et ytre krumningsområde 7 som er tilpasset det sirkulære indre tverrsnittet av det ytre røret 2, og som har et indre område 8 som er tilpasset til det polygonale eller sirkulære tverrsnittet til en sentral kjølekanal 4, og tverrsnittsprofilen har sidekanter 9, 10 som er orientert profilert mot midtpunktet 11 av en kjølekanal 4 som blir dannet;

å bringe sammen de profilerte superledende trådene 5 for å danne en langsgående sirkulær bunt 28 omkring en sentral kjølekanal 4;

å trekke den sirkulære bunten 28, som har en sentral kjølekanal 4, inn i det ytre røret 2.

I samsvar med en ytterligere utførelsesform angår oppfinnelsen også en fremgangsmåte for å fremstille en superledende hul kabel 1, som omfatter følgende trinn:

å fremstille profilerte superledende tråder 5 med en tverrsnittsprofil som en sluttstein som kjent for romerske steinbruer eller korsveiv, idet tverrsnittsprofilen til de profilerte superledende trådene 5 har et ytre krumningsområde 7 som er tilpasset det sirkulære indre tverrsnittet av det ytre røret 2, og som har et indre krumningsområde 8 som er tilpasset det polygonale eller sirkulære tverrsnittet til en sentral kjølekanal 4, og hvor tverrsnittsprofilen har sidekanter 9, 10 som er orientert profilert mot midtpunktet 11 for en kjølekanal 4 som skal dannes;

å bringe sammen de profilerte superledende trådene 5 for å danne en langstrakt sirkulær bunt 28 omkring en sentral kjølekanal 24;

å vikle minst én strammetråd omkring bunten i et spiralformet arrangement;

å dekke den omviklede strammetråden med et elektrisk isolerende og hermetisk tettende ytre lag av den superledende hule kabelen.

I samsvar med en ytterligere utførelsesform angår oppfinnelsen også en fremgangsmåte for å fremstille en superledende hul kabel 1, som omfatter følgende trinn:

å fremstille to halvskall av et kompakt ytre rør 2 med et sirkulært indre tverrsnitt og en sylindrisk innervegg 3;

å fremstille profilerte superledende tråder 5 med en tverrsnittprofil som en sluttstein som kjent fra romerske steinbroer eller korsveiv, idet tverrsnittprofilen til de profilerte superledende trådene har et ytre krumningsområde 7 som er tilpasset det sirkulære indre tverrsnitt av det ytre røret 2, og som har et indre krumningsområde 8 som er tilpasset det polygonale eller sirkulære tverrsnittet for en sentral kjølekanal 4, og tverrsnittprofilen har sidekanter 9, 10 som er orientert profilert mot midtpunktet 11 av en kjølekanal 4 som skal dannes;

å bringe sammen de profilerte superledende trådene 5 for å danne en langsgående sirkulær bunt 28 omkring en sentral kjølekanal 4;

å bringe sammen halvskallen, med bunten liggende inni, for å danne et kompakt ytre rør for den superledende hule kabelen.

Disse fremgangsmåtene for fremstilling av profilerte superledende tråder for en superledende hul kabel kan omfatte følgende trinn:

å profilere den runde standardformen av superledende tråder 5.

Profilering av tråden kan utføres ved hjelp av profilvalser.

Profilering av tråden kan videre utføres ved hjelp av en profilblokk.

Profilering av tråden kan videre utføres ved hjelp av formsmiing.

En ytterligere delvis innkapsling av de profilerte superledende trådene ved hjelp av metallbelegg kan videre være tilveiebrakt.

Oppfinnelsen vil nå bli forklart mer detaljert under henvisning til de vedføyde figurene.

Fig. 1 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel i henhold til en første utførelsesform av oppfinnelsen;

Fig. 2 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel i henhold til en annen utførelsesform av oppfinnelsen;

Fig. 3 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en detalj ved den superledende hule kabelen i henhold til fig. 2;

Fig. 4 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel i henhold til en tredje utførelsesform av oppfinnelsen;

Fig. 5 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom den inneledende formen av en superledende tråd før den forsynes med profilering;

Fig. 6 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en profilert superledende tråd etter at den er forsynt med en profilert form for en superledende hul kabel ifølge den første utførelsesform av oppfinnelsen i henhold til fig. 1;

5 Fig. 7 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en profilert superledende tråd etter å ha blitt forsynt med en profilert form for en superledende kabel ifølge den andre utførelsesform av oppfinnelsen i henhold til fig. 2;

Fig. 8 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en profilert superleder etter at den er gitt en profilert form for en superledende hul kabel ifølge den tredje utførelsesform av oppfinnelsen;

10 Fig. 9 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel ifølge en fjerde utførelsesform av oppfinnelsen;

Fig. 10 viser tverrsnittet i skjematisk form gjennom to varianter av en superledende hul kabel ifølge en femte utførelsesform av oppfinnelsen;

15 Fig. 11 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel ifølge en sjette utførelsesform av oppfinnelsen;

Fig. 12 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel ifølge en sjuende utførelsesform av oppfinnelsen;

Fig. 13 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel i henhold til en åttende utførelsesform av oppfinnelsen;

20 Fig. 14 viser, som fig. 14a, et bilde, og som fig. 14b, en tegning på skjematisk form av en superledende hul kabel av CICC-typen i et standard arrangement;

Fig. 15 viser, som fig. 15a, et bilde, og som fig. 15b, et tverrsnitt i skjematisk form, gjennom en superledende hul kabel av CICC-typen i henhold til den kjente teknikk (POLO-kabel);

25 Fig. 16 viser, som fig. 16a, et bilde, og som fig. 16b, en tegning i skjematisk form, av en superledende kabel av Nuclotron-typen i et standardarrangement; og

Fig. 17 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel av Nuclotron-typen i et forbedret arrangement.

30 Fig. 1 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel 1 ifølge en første utførelsesform av oppfinnelsen. Denne hule kabelen 1 har en sentral kjølekanal 4 som er omgitt av profilerte superledende tråder 5, som vanligvis er snodde multifilamenttråder. I det tverrsnittet som er vist her, danner de profilerte superledende trådene 5 en ring som direkte omgir den sentrale kjøle-

kanalen 4 slik at disse profilerte superledende trådene kan kjøles intensivt ved hjelp av kjølemiddelstrømmen. De profilerte superledende trådene 5 blir holdt sammen ved hjelp av et fast konstruert ytre rør 2 som har en innervegg 3, mot hvilken de profilerte superledende trådene 5 ligger tett an. De profilerte superledende trådene 5 har et tverrsnitt som svarer til en sluttstein i en romersk bro og/eller et gotisk velv.

Denne profilen har et ytre krumningsområde 7 som er tilpasset krumningen av innerveggen 3 til det ytre røret 2. Videre har tverrsnittet av de profilerte superledende trådene 5 et indre krumningsområde 8 som er tilpasset krumningen av den sentrale kjølekanalen 4. I denne første utførelsesformen av oppfinnelsen har de profilerte superledende trådene 5 glatte sidekanter 9 og 10 som er orientert mot midtpunktet 11 av den sentrale kjølekanalen 4. Gapbredden s mellom sidekantene av tilstøtende superledende tråder 5 kan ikke være så stor som man kunne ønske fordi den ringformede strukturen til de superledende trådene 5 og følgelig kjølekanalen 4, under drift ellers blir ødelagt. Summen $n \cdot s$ av alle gapbredder s må derfor være mindre enn differansen i lengden Δl til krumningslengden l_{ak} for det ytre krumningsområde 7 minus krumningslengden l_{ik} for det indre krumningsområde 8 av profilen til de profilerte superledende trådene 5.

Fordi tjue profilerte superledende tråder 5 er anordnet i denne første utførelsesformen av oppfinnelsen, er den gapbredden s som kan tolereres mellom sidekantene til tilstøtende superledende tråder 5 uhyre begrenset. Denne begrensningen er heller ikke minst avhengig av differansen mellom den indre radien r_a for det ytre røret 2 og den indre radien r_i for kjølekanalen 4, som forklart i formelen ovenfor. En superledende hul kabel 1 av en slik type har den fordel at resistansen mot strømning inne i kjølekanalen 4 er uhyre lav og følgelig kan en høy kjølehastighet og høy mekanisk stabilitet oppnås. Den har videre den fordel at kjølemediet er i direkte kontakt med de profilerte superledende trådene 5 og følgelig blir intensiv kjøling sikret selv for korte varmpulser. Denne hule kabelen har til slutt den fordel at den er sammensatt av hovedsakelig bare to lag eller komponenter: nemlig den konsentriske bunten med sluttsteinformede profilerte superledende tråder 5 og det fast konstruerte ytre rør 2. I tillegg vil dette, for det formål å skaffe (ytterligere) elektrisk isolasjon, kan denne superledende hule kabelen 1 ifølge oppfinnelsen ha Kapton-bånd viklet omkring den ytre konturen 17 av det ytre røret 2 og om nød-

vendig, ytterligere elektrisk isolerende lag, f.eks. av fiberglassbånd. Dette gjelder alle de variantene som svarer til figurene 1, 2, 4, 9, 10, 11 og 12.

Den hule kabelen 1 i den andre utførelsesformen skiller seg fra den hule kabelen 1 i den første utførelsesformen ved profileringen av de profilerte superledende trådene 5. I tillegg til sluttsteinformen har disse profilerte superledende trådene 5 en forskyvning av størrelse v , som i tillegg forbedrer den innbyrdes pasningen mellom de profilerte superledende trådene 5 og tillater større gapbredder s mellom de tilstøtende profilerte sidekantene 12 og 13 for disse profilerte superledende trådene 5. Forholdet mellom den mulige gapbredden s og differansen i lengde Δl mellom de ytre og indre områdene med krumning og størrelsen v for forskyvningen er allerede blitt diskutert i detalj ovenfor.

Fig. 3 viser et tverrsnitt, i skjematisk form, gjennom en detalj ved den superledende hule kabelen 1 i henhold til fig. 2. Komponenter som har samme funksjoner som på de foregående figurer er identifisert med de samme referansesymboler og blir ikke diskutert separat. Fig. 3 viser, i større skala, den innbyrdes sammenpassningen av de profilerte superledende trådene 5 ved hjelp av forskyvningen 19 av tilstøtende profilerte sidekanter 12 og 13.

Fig. 4 viser et tverrsnitt, i skjematisk form, gjennom en superledende hul kabel 1 ifølge en tredje utførelsesform av oppfinnelsen. Denne tredje utførelsesformen av oppfinnelsen skiller seg fra de foregående utførelsesformer ved at antallet profilerte superledende tråder 5 er blitt redusert fra tjue på fig. 1 og 2 til ti på fig. 4. Den innbyrdes sammenpassningen av de profilerte superledende trådene 5 er forsterket ved hjelp av det faktum at de superledende trådene 5 har spisse profiler 20 på sine profilerte sidekanter 12 og 13. Disse spisse profilene 20 danner en forskyvning med størrelse v som i samvirke med forskjellen i lengde Δl mellom de ytre og indre krumningsområdene 7 og 8 av tverrsnittene for de profilerte superledende trådene 5 øker toleransen for gapbredden s slik at en høyere toleranse med hensyn til gapbredde s som dannes, kan tillates uten at strukturen til de superledende trådene som er anordnet inne i det ytre røret 2, faller sammen.

Fig. 5 viser et tverrsnitt, i skjematisk form, gjennom en superledende multifilamenttråd i et vanlig arrangement. Slike tråder har et sirkulært tverrsnitt og omfatter, som beskrevet foran, snodde superledende filamenter i en mer eller mindre kompleks Cu-matriks.

Fig. 6 viser et tverrsnitt, i skjematisk form, gjennom en profilert superledende tråd 5 etter at den er blitt forsynt med en profilert form for en superledende hul kabel 1 ifølge den første utførelsesform av oppfinnelsen på fig. 1. I løpet av frembringelsen av denne formen blir en tråd ifølge fig. 5 valset ved å bruke forskjellige valseprofiler slik at det på den ene side blir dannet et ytre krumningsområde 7 og på den annen side et indre krumningsområde 8. Videre blir sidekantene 9 og 10 valset ved hjelp av valsesett ved en passende vinkel i forhold til hverandre. I stedet for en valsemekanisme kan trekking gjennom en passende formgivende trekkring også anvendes. I tilfelle av denne metoden blir den runde tråden som er vist på fig. 5, omformet til en profilert superledende tråd 5 med et tverrsnitt styrt av trekkringen.

Fig. 7 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en profilert superledende tråd 5 etter å ha blitt gitt en profilert form for en superledende kabel 1 for den andre utførelsesformen av oppfinnelsen i samsvar med fig. 2. I stedet for glatte sidekanter som fremdeles er vist på fig. 6, er i dette tilfelle profileringen av de profilerte sidekantene 12 og 13 formet eller trukket gjennom en trekkblokk. I prosessen blir det dannet avtrappede skuldre 19 som muliggjør innbyrdes inngrep mellom de profilerte superledende trådene 5 når den hule kabelen blir montert.

Fig. 8 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en profilert superledende tråd 5 etter å ha blitt gitt en profilert form for en superledende hul kabel 1 ifølge den tredje utførelsesformen av oppfinnelsen ifølge fig. 4. Denne profilen, som har profilspiss 20 på sidekanten 12, kan være fremskaffet ved passende forming av et innledningsvis sirkulært tverrsnitt som vist på fig. 5. For dette formålet kan enten fire forskjellige formprofildannende valser eller en trekkåpning av passende form brukes til å fremstille de fire profilkantene til tverrsnittet av de profilerte superledende trådene 5. En fordel ved disse profilerte superledende trådene 5 på fig. 8 i forhold til de på fig. 7, er at en utad bulende spiss profil 20 for den profilerte sidekanten 12 er lettere å fremstille ved hjelp av profilvalser enn hva som er mulig for den profilen som har en avtrappet skulder 19 på fig. 7, og at det innbyrdes inngrepet mellom disse formene bidrar til at de profilerte superledende trådene orienterer seg selv omkring kjølekanalen.

Fig. 9 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul lederkabel 1 ifølge en fjerde utførelsesform av oppfinnelsen. Komponenter med

samme funksjoner som på de foregående figurene, er identifisert med samme henvisningssymboler og blir ikke diskutert separat. Forskjellen fra de foregående utførelsesformene ligger i det faktum at som det solid konstruerte ytre røret 2 er det valgt et ytre rør som, selv om det har en sylindrisk indre vegg 3, har en kvadratisk ytre kontur 17, og som et resultat av dette blir for det første styrken av det ytre røret 2 øket, og for det andre kan produksjonen av kompakte spoler forenkles betydelig.

Fig. 10 viser tverrsnitt i skjematisk form gjennom to varianter av en superledende hul kabel 1 i henhold til en femte utførelsesform av oppfinnelsen. Komponenter med samme funksjon som på de foregående figurene, er identifisert med de samme henvisningssymbolene og blir ikke separat diskutert. Forskjellen mellom denne femte utførelsesformen av oppfinnelsen og de foregående utførelsesformene er at det ytre røret 2 som har en kvadratisk ytre kontur 17, i hjørnene av det kvadratiske ytre røret 2 har ytterligere kjølekanaler 18 i den langsgående retningen av den hule kabelen 1. Kjølevirkningen kan følgelig som allerede beskrevet foran, intensiveres ytterligere for denne hule kabelen 1.

Fig. 11 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel 1 ifølge en sjette utførelsesform av oppfinnelsen, hvor henvisningstall 5 betegner profilerte superledende tråder, henvisningstallet 2 betegner det ytre røret og henvisningstall 18 betegner kjølekanaler i det ytre røret 2 i langsgående retning av sistnevnte. På grunn av disse ytre kjølekanalene 18 som strekker seg langs innerveggen til det ytre røret og som har en åpning til bunten av profilerte superledende tråder, er det snodde profilerte superledende trådene følgelig ytterligere avkjølt fra utsiden i direkte kontakt med kjølemiddelet etter hver kvart dreining av den spiralformede forskyvningen. Også i denne varianten blir alle trådene utsatt for absolutt identiske elektromagnetiske, mekaniske og termiske forhold.

Fig. 12 viser tverrsnitt, i skjematisk form, gjennom en superledende hul kabel 1 i henhold til en sjuende utførelsesform av oppfinnelsen. Den sjuende utførelsesformen av oppfinnelsen skiller seg fra de foregående utførelsesformene ved at det ytre røret 2 har en trapesformet ytre kontur 17. Den trapesformede ytre konturen 17 kan være fordelaktig når et antall av disse superledende hule kablene 1 blir samlet i en sirkulær spole eller når spesielle spolegeometrier må produseres på en mekanisk kompakt måte og på så stabil måte som mulig.

Fig. 13 viser et tverrsnitt i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel 1 i henhold til en åttende utførelsesform av oppfinnelsen. Komponenter som har samme funksjoner som på de foregående figurene, er identifisert med de samme henvisningssymboler og blir ikke separat diskutert. Det ytre røret i dette tilfelle er laget av to lag: et første lag som har en strammetråd 33, f.eks. av NiCr, viklet i spiralarrangement, og et elektrisk isolerende, hermetisk tett ytre lag 34, f.eks. frembrakt ved hjelp av polymerisering. Som allerede beskrevet foran, skiller denne åttende utførelsesformen av oppfinnelsen seg fra de foregående utførelsesformene ved at i stedet for et solid konstruert ytre rør, blir en kappe for de profilerte superledende trådene tilveiebrakt ved hjelp av strammetråd viklet i et spiralarrangement, til hvilket et elektrisk isolerende, hermetisk tett ytre lag deretter er påført.

Fig. 14 viser, som fig. 14a, et fotografi, og som fig. 14b, en tegning, i skjematisk form, av en superledende hul kabel av CICC-typen i et standard arrangement. Komponenter som har samme funksjoner som på de foregående figurene er identifisert med de samme henvisningssymbolene og blir ikke separat diskutert her. Fig. 14 viser en bunt av snodde superledende tråder 30 som løper inne i et hermetisk tett rør 32.

Fig. 15 viser, som fig. 15a, et fotografi, og som fig. 15b, et tverrsnitt, i skjematisk form gjennom en superledende hul kabel av CICC-typen i henhold til kjent teknikk (POLO-kabel). Komponenter som har samme funksjoner som på foregående figurer, er identifisert med de samme henvisningssymbolene og blir ikke separat diskutert her. I dette tilfelle er de superledende trådene 30 arrangert på et solid konstruert indre rør 21 som et indre bærerør, hvor den indre kjølekanalen er anordnet for en tofase heliumstrøm og direkte passasje av superkritisk helium mellom de superledende trådene 30 blir mulig med høy strømningsmotstand.

Fig. 16 viser, som fig. 16a, et fotografi, og som fig. 16b, en tegning, i skjematisk form, av en superledende kabel av Nuclotron-typen i et standardarrangement. Komponenter som har samme funksjoner som på de foregående figurene, er identifisert med de samme henvisningssymbolene og blir ikke separat diskutert her. Fig. 16 viser i en sentral kjølekanal dannet av et kompakt indre rør 21 av CuNi tofase-helium 35 som blir ført gjennom kanalen. På det indre røret 21 er det viklet superledende tråder 30 som blir holdt sammen ved hjelp av en NiCr-strammetråd

33. Et Kepton-bånd 24 danner elektrisk isolasjon og et fiberglassbånd 25 tjener til termisk isolasjon av den superledende hule kabelen.

Fig. 17 viser et tverrsnitt, i skjematisk form, gjennom en superledende hul kabel 1 av Nuclotron-typen i et forbedret arrangement. Komponenter som har samme funksjon som på de foregående figurene, er identifisert med de samme henvisningssymbolene og blir ikke separat diskutert. Fig. 17 viser en sentral kjølekanal 4 dannet av et kompakt indre rør 21 av CuNi. På det indre røret 21 er det viklet profilerte superledende tråder 5 som blir holdt sammen ved hjelp av en NiCr-strammetråd. Et elektrisk isolerende, hermetisk tett ytre lag 34 er anordnet på strammetråden 33.

Liste over referansesymboler

- | | | |
|----|----|---|
| | 1 | Superledende hul kabel |
| | 2 | Ytre rør |
| 5 | 3 | Indre vegg av ytre rør |
| | 4 | Sentral kjølekanal |
| | 5 | Profilert superledende tråd |
| | 6 | Superlende filament |
| | 7 | Ytre krumningsområde |
| 10 | 8 | Indre krumningsområde |
| | 9 | Glatt sidekant |
| | 10 | Glatt sidekant |
| | 11 | Midtpunkt for kjølekanal |
| | 12 | Profilert sidekant |
| 15 | 13 | Profilert sidekant |
| | 14 | Superledende filament |
| | 15 | Metallkjerne eller sentrum av stabiliserende matriks for en superledende multifilamentleder |
| | 16 | Kappe av den stabiliserende matriksen for en superledende multifilamentleder av en profilert tråd |
| 20 | | |
| | 17 | Ytre kontur av ytre rør |
| | 18 | Kjølekanaler i det ytre røret i langsgående retning |
| | 19 | Trinnformet skulder (avtrappet profil) |
| | 20 | Spiss profil for en sidekant |
| 25 | 21 | Kompakt indre rør |
| | 24 | Kapton-bånd |
| | 25 | Fiberglassbånd |
| | 26 | Ytre kappe for indre rør |
| | 27 | Innervegg i indre rør |
| 30 | 28 | Bunt omfattende superledende filamenter |
| | 29 | Tråd fra en bunt som omfatter superledende filamenter og stabiliserende matriks |
| | 30 | Matriks |

	31	Bunt av snodde superledende tråder
	32	Hermetisk tett rør
	33	Strammetråd viklet i et spiralarrangement
	34	Elektrisk isolerende, hermetisk tett ytre lag
5	35	Tofase-helium
	l_{ak}	Lengde av ytre krumningsområde
	l_{ik}	Lengde av indre krumningsområde
	Δl	Lengdeforskjell
	s	Gapbredde
10	v	Forskyvningsstørrelse
	n	Antall profilerte superledende tråder pr. superledende hul kabel
	r_a	Indre radius av ytre rør
	r_i	Radius av sentral kjølekanal

PATENTKRAV

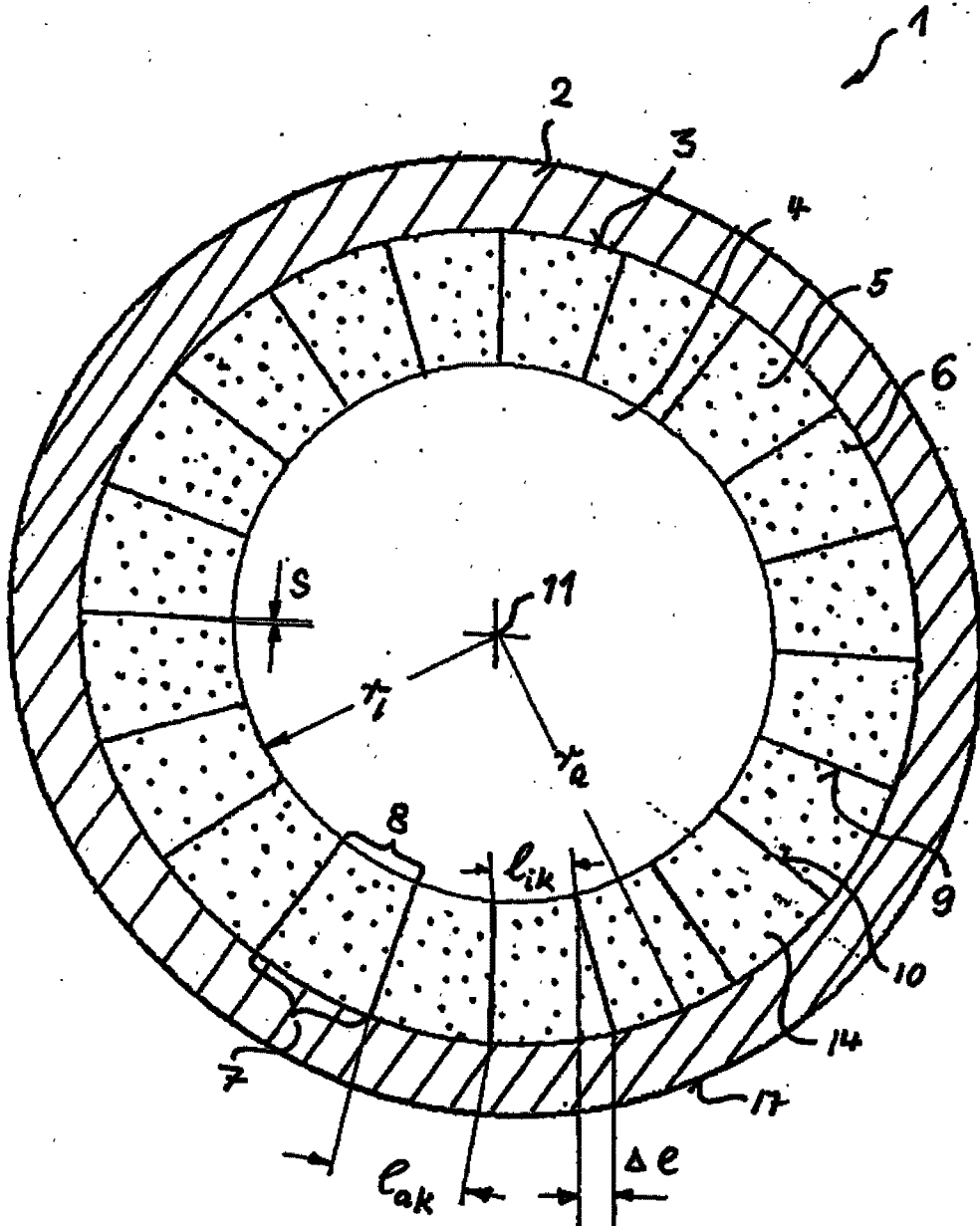
1. Superledende hule kabel (1) som omfatter følgende trekk:
et ytre rør (2) med et sirkulært indre tverrsnitt og en sylindrisk innervegg (3);
5 en sentral kjølekanal (4) som har et polygonalt eller sirkulært tverrsnitt som er mindre enn det indre tverrsnittet av det ytre røret (2);
profilerte superledende tråder (5) som er anordnet mellom innerveggen (3) og kjølekanalen (4) og som omfatter minst ett superledende filament (6), og som har en tverrsnittsprofil som en sluttstein som kjent fra romerske steinbroer eller
10 korsvelv,
idet tverrsnittsprofilen til de profilerte superledende trådene (5) har et ytre krumningsområde (7) som er tilpasset til det polygonale eller sirkulære indre tverrsnittet til det ytre røret (2) og tverrsnittsprofilen til de profilerte superledende trådene (5) har sidekanter (9, 10) som er orientert mot midtpunktet (11) til kjøle-
15 kanalen (4);
karakterisert ved at
de profilerte superledende trådene (5) er anordnet på innerveggen (3) i det ytre røret (2);
tverrsnittsprofilen til de profilerte superledende trådene (5) har et indre
20 krumningsområde (8) som er tilpasset det sirkulære tverrsnittet til kjølekanalen (4);
de profilerte superledende trådene (5) danner ved hjelp sine indre krumningsområder (8) den sylindriske kjølekanalen (4) i den superledende hule kabelen (1), idet trådene er anordnet med sine radially orienterte sidekanter (9, 10) så tett mot hverandre og med sine ytre krumningsområder (7) så tett på den indre
25 veggen i det ytre røret (2) at de kan holde seg selv på plass ved hjelp av en formbasert og kraftbasert pasning og danne kjølekanalen (4) ved alle driftstemperaturer for den superledende hule kabelen (1).

2. Kabel ifølge krav 1,
karakterisert ved at
summen av gapbredder (s) for mulige radiale gapdannelser mellom de
profilerte superledende trådene (5) er, ved alle driftstemperaturer for den super-
ledende hule kabelen (1) mindre enn differansen i lengde (Δl) mellom de ytre sju
5 og indre åtte krumningsområdene for en individuell, profilert superledende tråd.
3. Kabel ifølge krav 1,
karakterisert ved at
10 de profilerte superledende trådene (5) har profilerte sidekanter (12, 13) som
griper inn i hverandre.
4. Kabel ifølge krav 1 eller 2,
karakterisert ved at
15 de profilerte superledende trådene (5) har spesielle overflatebelegg eller
spesielle kappemidler med høy motstand for å redusere virvelstrømseffekter og
termiske tap.
5. Kabel ifølge et av de foregående krav,
20 karakterisert ved at
de profilerte superledende trådene (5) er snodd omkring den sentrale kjøle-
kanalen.
6. Kabel ifølge et av de foregående krav,
25 karakterisert ved at
de profilerte superledende trådene (5) har keramiske superledere eller
høytemperatur-superledere.
7. Kabel ifølge et av de foregående krav,
30 karakterisert ved at
det ytre røret (2) har en sirkulær, kvadratisk eller trapesformet ytre
kontur (17).

8. Kabel ifølge et av de foregående krav,
karakterisert ved at
det ytre røret (2) omfatter kjølekanaler (18) i sin langsgående retning.
- 5 9. Kabel ifølge et av de foregående krav,
karakterisert ved at
den termiske utvidelseskoeffisienten for materiale i et kompakt ytre rør (2)
er større enn den termiske utvidelseskoeffisienten til de profilerte superlederne (5).
- 10 10. Fremgangsmåte for fremstilling av en superledende hul kabel (1),
karakterisert ved følgende trinn:
å fremstille profilerte superledende tråder (5) med en tverrsnittsprofil som
en sluttstein kjent fra romerske steinbroer eller korsvelv, idet tverrsnittsprofilen til
de profilerte superledende trådene (5) har et ytre krumningsområde (7) og et indre
15 krumningsområde (8) som er tilpasset et sirkulært eller polygonalt tverrsnitt for en
sentral kjølekanal (4), og tverrsnittsprofilen har sidekanter (9, 10) som er orientert
mot midtpunktet (11) i en kjølekanal (4) som skal dannes ved hjelp av de indre
områdene (8);
å bringe sammen de profilerte superledende trådene (5) for å danne en
20 langstrakt sirkulær bunt (28), hvor sidekantene (9, 10) til de tilstøtende profilerte
superledende trådene (5) som ligger mot hverandre og de indre områdene oppe,
danner en sentral kjølekanal (4);
og, alternativt:
å trekke den sirkulære bunten (28) som har den sentrale kjølekanalen (4)
25 inn i et ytre rør (2), eller
å bringe sammen to halvskall av et kompakt ytre rør (2) som har et sirkulært
indre tverrsnitt og en sylindrisk indre vegg (3), med bunten (28) liggende inni, for å
danne et kompakt ytre rør for den superledende hule kabelen.

11. Fremgangsmåte ifølge krav 10,
karakterisert ved at
minst én strammetråd er viklet omkring bunten (28) i et spiralarrangement,
og den omviklede strammetråden er dekket med et elektrisk isolerende og herme-
5 tisk tett ytre lag for den superledende hule kabelen før halvskallene bringes sam-
men for å danne det ytre røret.
12. Fremgangsmåte for fremstilling av profilerte superledende tråder for en
superledende hul kabel, ifølge krav 10 eller 11, som omfatter følgende trinn:
10 å profilere den runde standardformen til superledende tråder (5).
13. Fremgangsmåte ifølge krav 12,
karakterisert ved at
profilering av tråden blir utført ved hjelp av profilvalser.
15
14. Fremgangsmåte ifølge krav 12,
karakterisert ved at
profilering av tråden blir utført ved hjelp av en profilblokk.
- 20 15. Fremgangsmåte ifølge krav 12,
karakterisert ved at
profilering av tråden blir utført ved hjelp av form-smiing.
- 25 16. Fremgangsmåte ifølge et av kravene 9 til 13,
karakterisert ved at
en ytterligere delvis omkapsling av de profilerte superledende trådene blir
utført ved hjelp av metallbelegning.

FIG 1



2/12

FIG 2

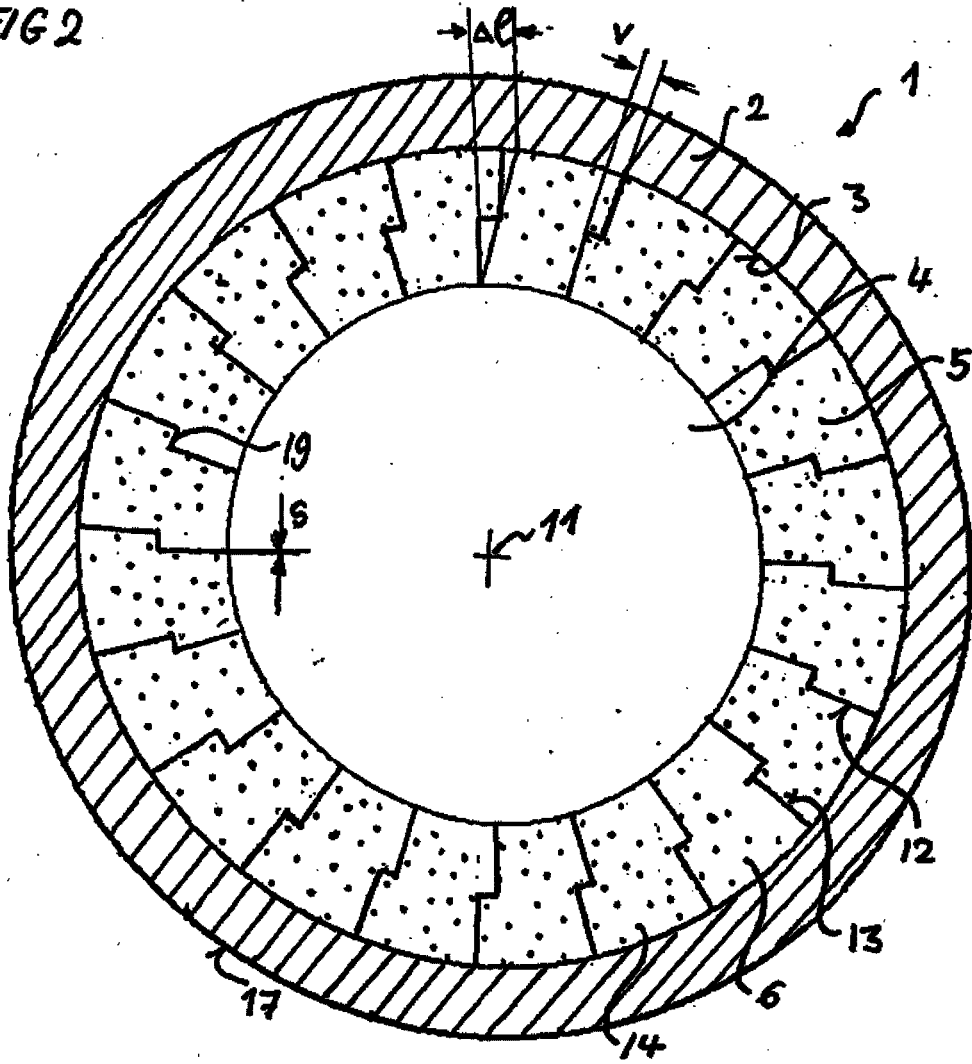
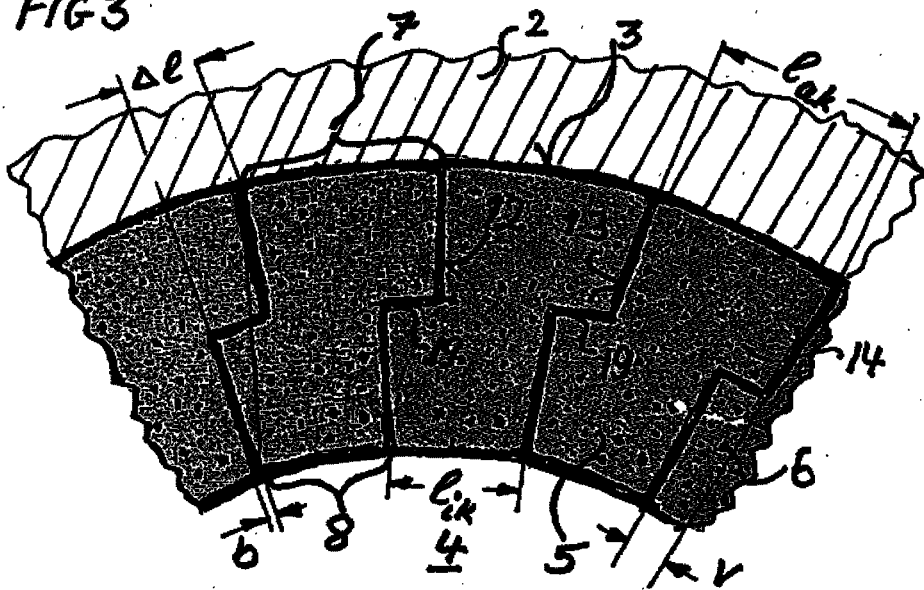
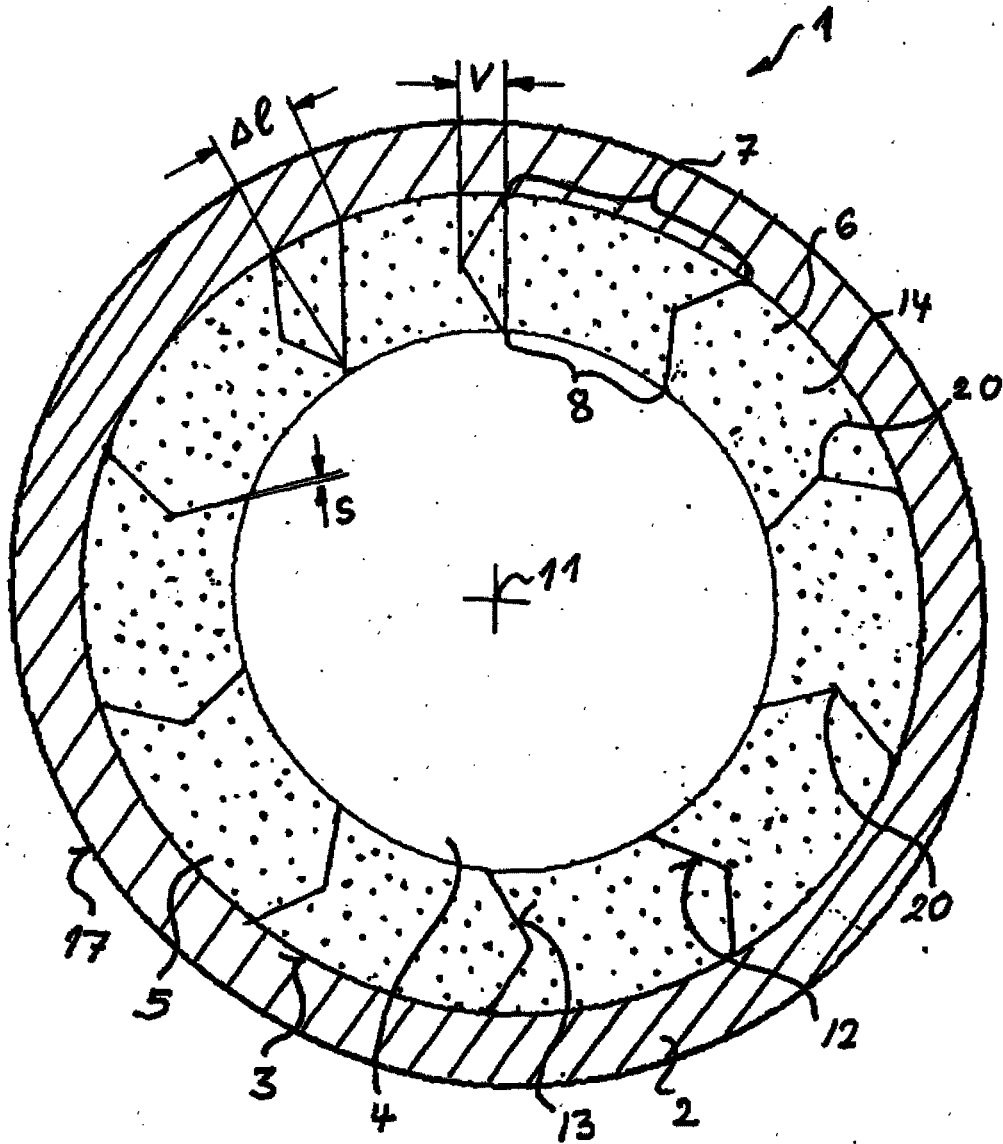


FIG 3



3/12

FIG 4



4/12

FIG 5

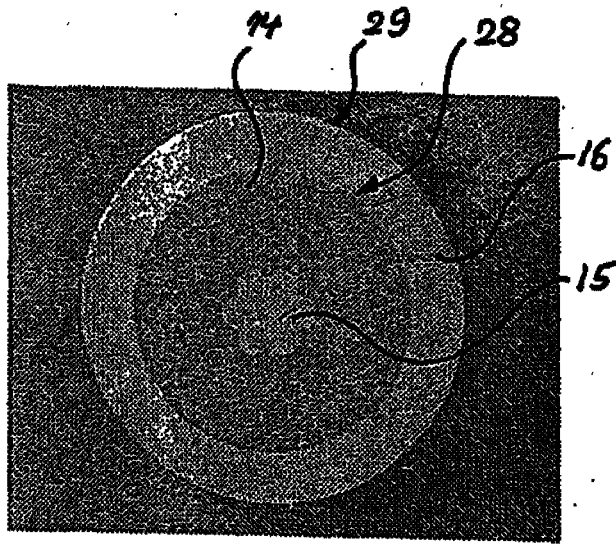
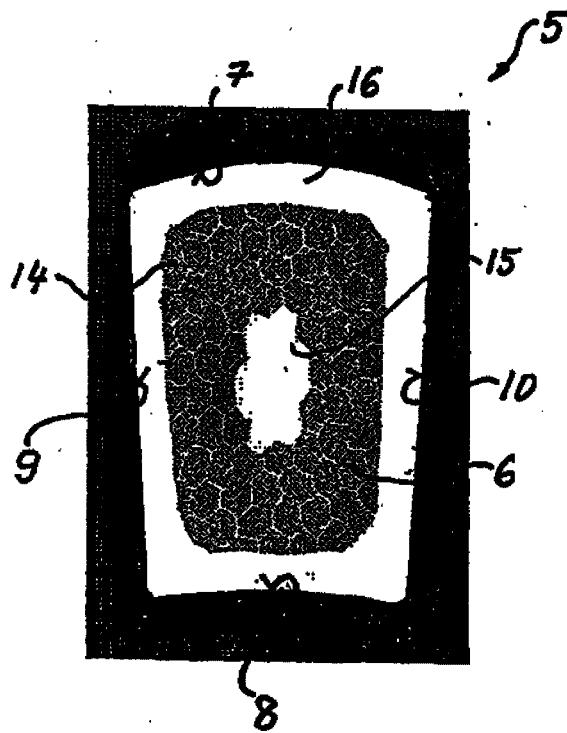


FIG 6



5/12

FIG 7

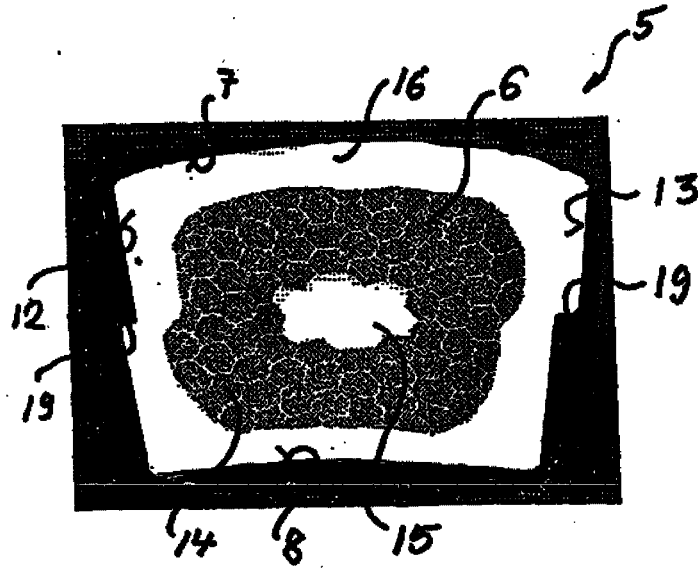
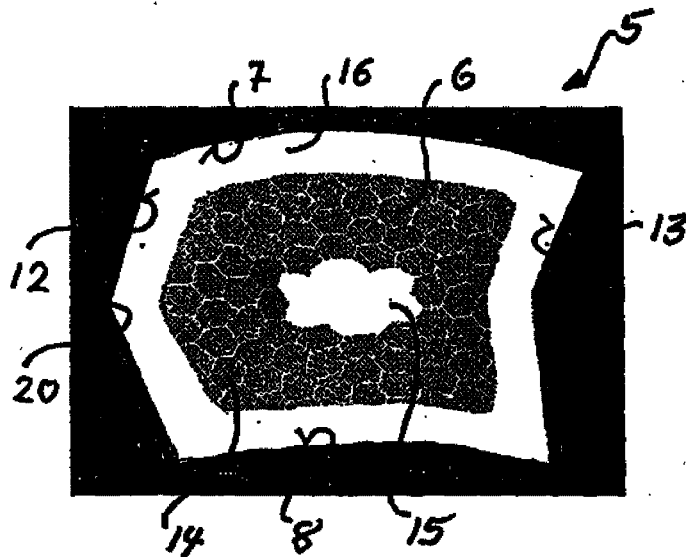


FIG 8



6/12

FIG 9

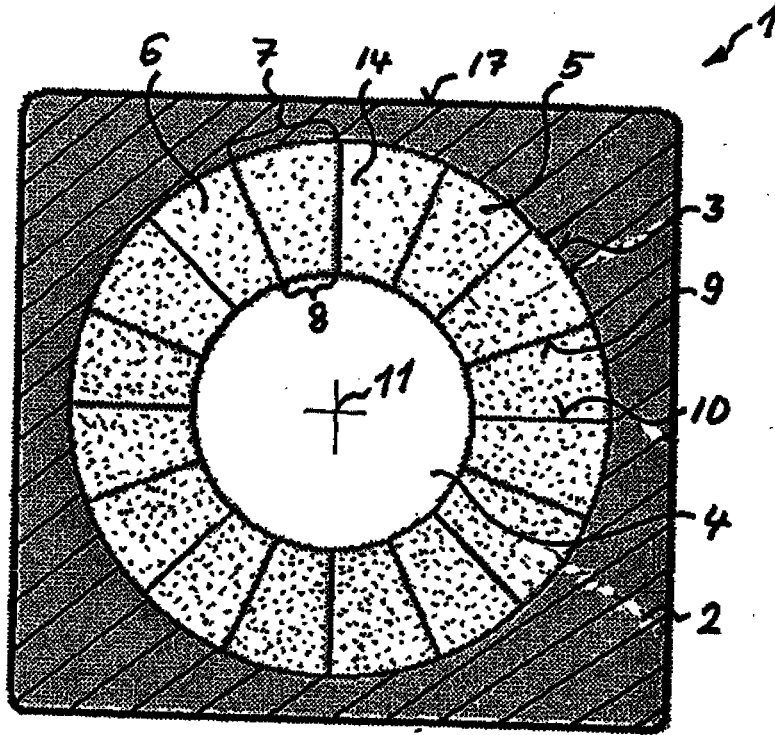
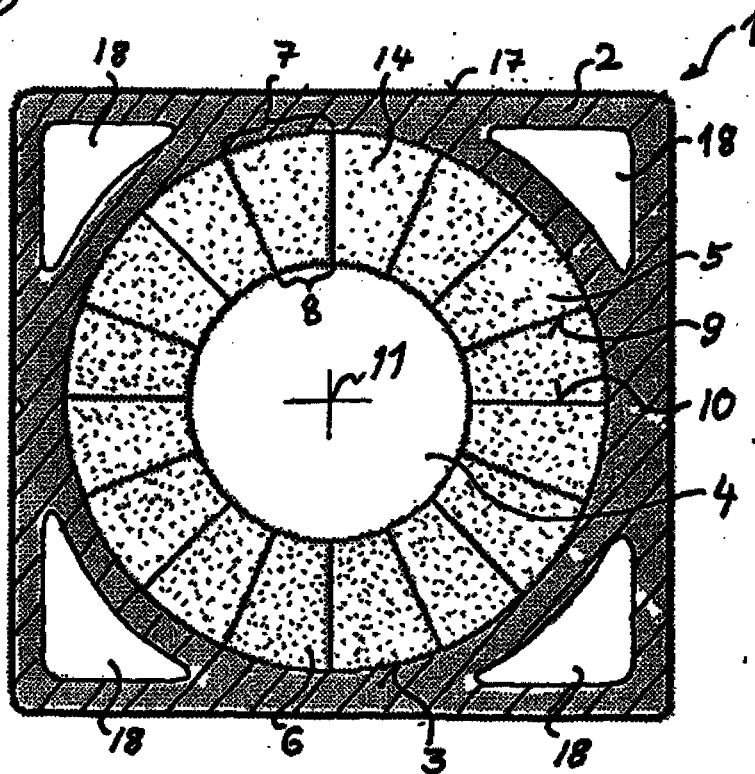


FIG 10



7/12

FIG 11

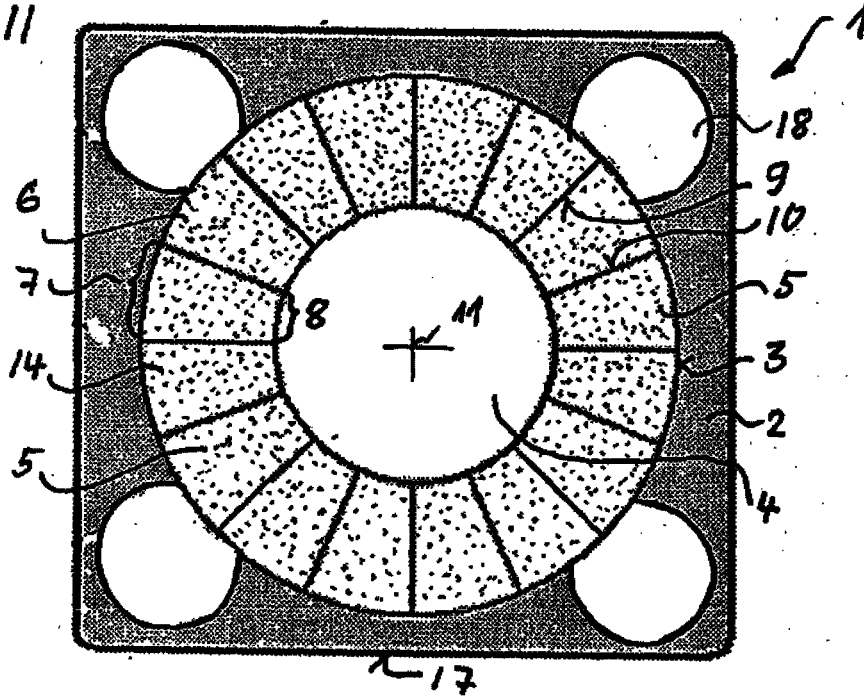
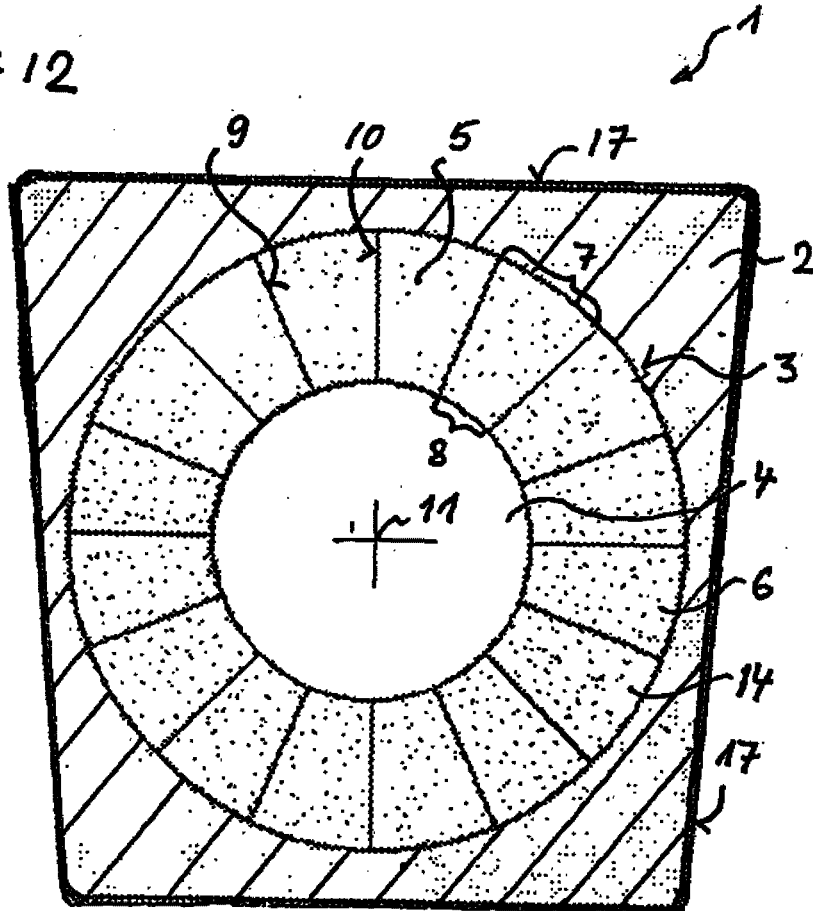
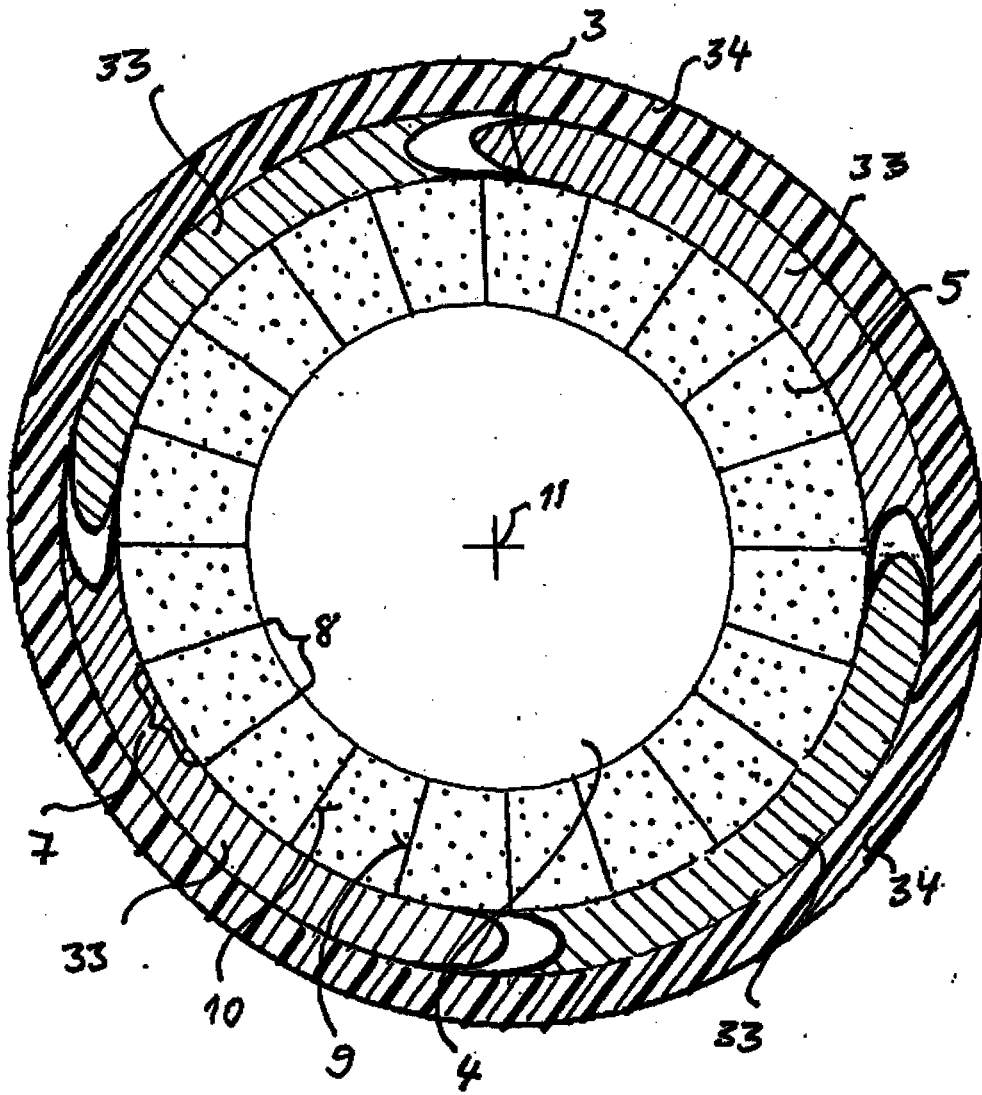


FIG 12



8/12

FIG 13



9/12

FIG 14a

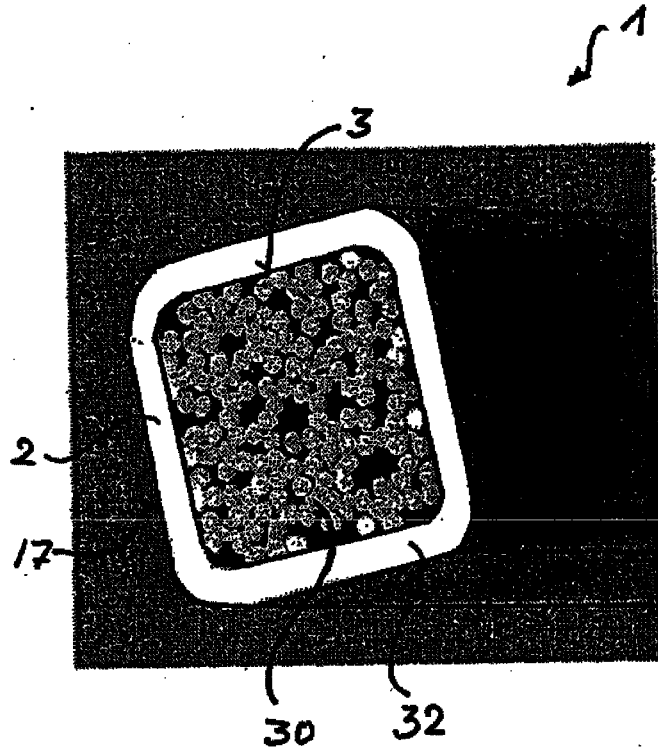
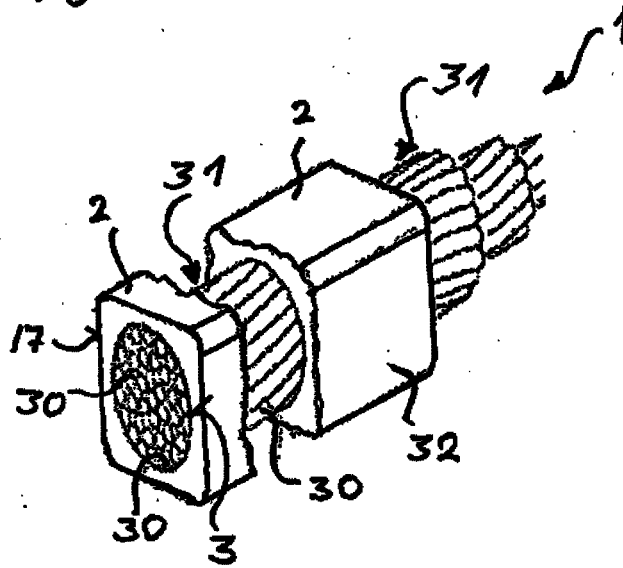


FIG 14b



10/12

FIG 15a

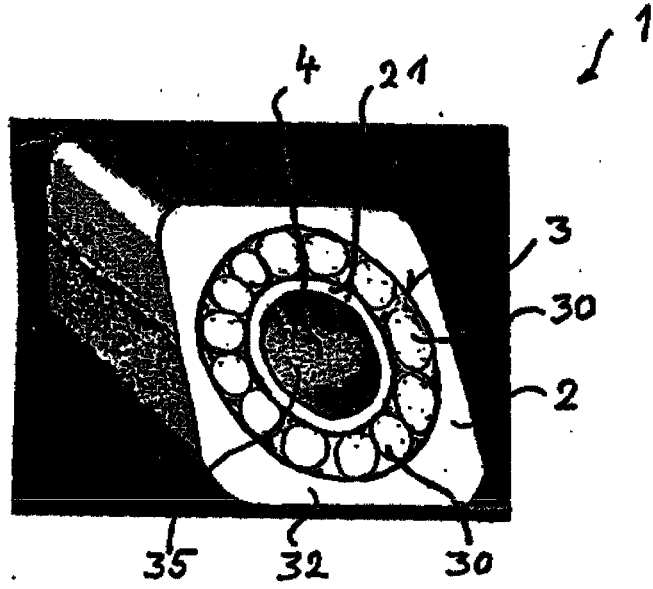


FIG 15b

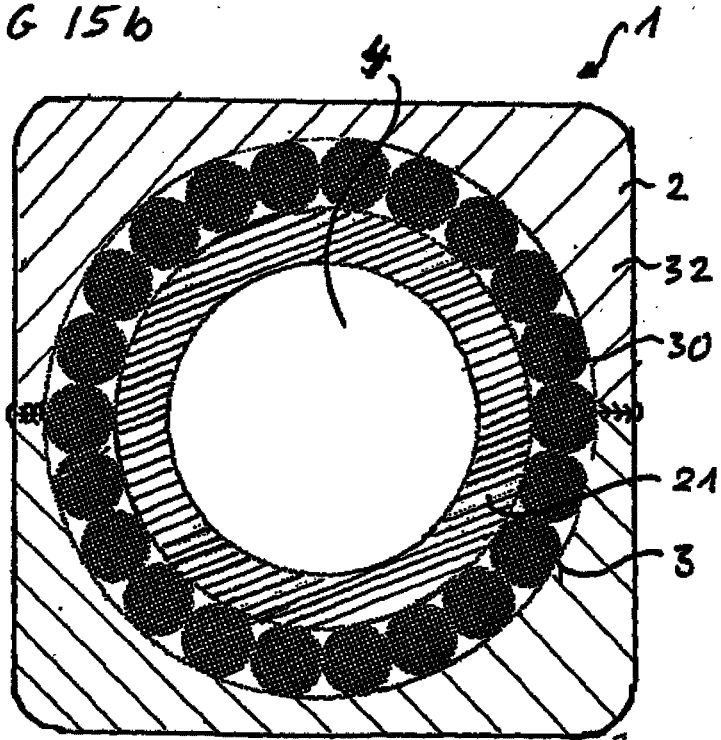


FIG 16a

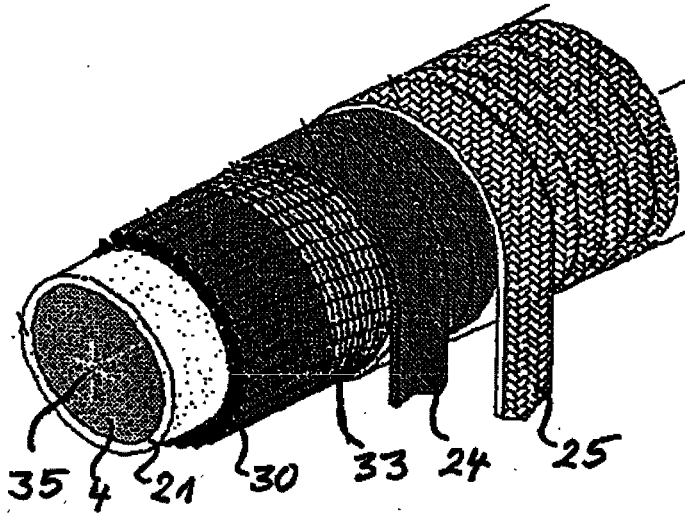


FIG 16b

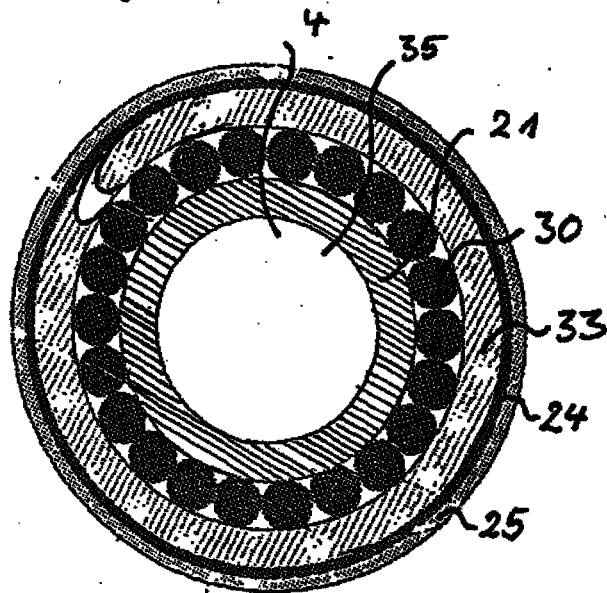


FIG 17

