



Slebne
diamanter til
smykkebrug.
Foto. Shutter-
stock.

PÅ JAGT EFTER STORE DIAMANTER

Ved hjælp af en elektronaccelerator og en PET-skanner kan man afsløre, om et klippestykke indeholder en diamant.

Artiklens forfattere deltager i udviklingen af denne metode, som kan gøre jagten på diamanter mere effektiv og miljøvenlig.

Diamanter har i umindelige tider været efterstræbt af mennesket på grund af deres uovertrufne egenskaber. De første kendte udnyttelser af diamanter var i Kina og Indien allerede for omkring 6000 år siden. Med til at gøre diamanter til noget særligt er naturligvis deres sjældenhed. På trods af, at man i dag kan producere kunstige diamanter, så er det stadig langt fra muligt at producere store diamanter til ædelsten, der blot tilnærmelsesvis ligner naturlige diamanter i både størrelse og klarhed. Derfor er fund af naturlige diamanter stadig nøglen til at skaffe de største og mest eftertragtede diamanter.

Naturlige diamanter er dannet under meget specielle forhold, og findes specielt i Sydafrika, Sibirien, Brasilien, Indien og Congo. Diamanterne er dannet i den jordiske magma i omkring 150 km's dybde og transporteret til jordoverfladen i forholdsvis små vulkanske rør, der siden er størknet. Bjergarten i disse vulkanske rør kaldes kimberlit efter den sydafrikanske by Kimberley, hvor diamanter først blev fundet direkte i det vulkanske klippemateriale i 1871. Der kendes i dag omkring 6000 sådanne vulkanske rør, men kun et fåtal af dem, cirka en procent, er rentable til diamanthusvindning.

Jo større, jo bedre

I dag finder man diamanter ved minedrift, hvor man bringer klippeblokke af kimberlit til jordoverfladen, knuser disse blokke og ekstraherer diamanterne ved sortering, blæsning og skylning. Når man knuser blokkene kan man imidlertid også let komme til at knuse diamanterne, da disse på trods af, at de er det hårdest kendte materiale på jorden, er ret skrøbelige og relativt let kan kløves langs deres krystallografiske retninger. Man mener, at det er en af grundene til, at der ikke er fundet store diamanter de seneste omkring 100 år, dvs. tilbage til tiden, hvor man tog den nuværende knusningsmetode i brug. Man kan selvfølgelig også

Forfatterne

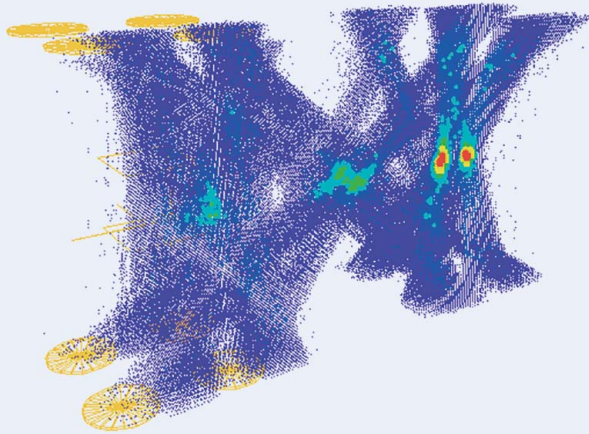


Søren Pape Møller er centerleder Centre for Storage Ring Facilities (ISA). Han er ekspert i accelerators og har designet og arbejdet med accelerators i både universitetsverdenen og industrien, siden han som færdiguddannet kom til CERN i 1981. fyssp@phys.au.dk



Ulrik Uggerhøj er professor. Ulrik har arbejdet med bl.a. højenergi strålingsudsendelse og -absorption på CERN de seneste 25 år. ulrik@phys.au.dk

Begge ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

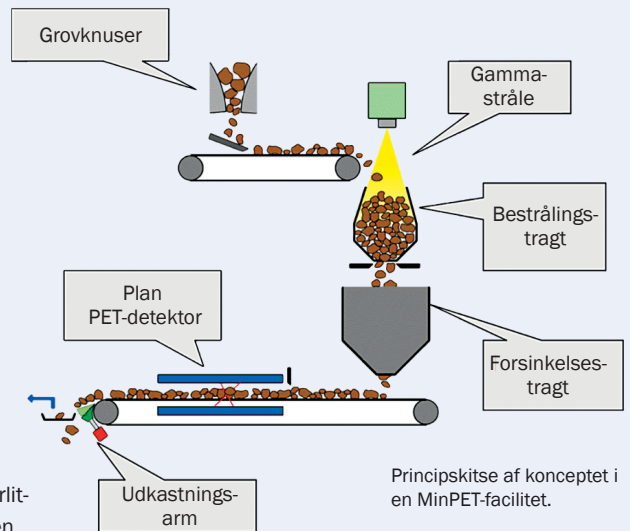


Princippet bag MinPET

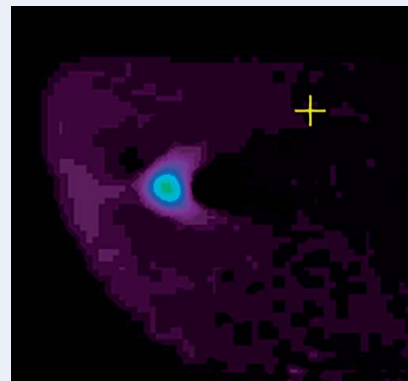
Figuren ovenfor viser princippet i detektion af diamanter i kimberlit-stykker ved hjælp af en PET-scanner. Efter at kulstof i kimberlitten er blevet aktiveret ved hjælp af gammastråler udsendes positroner fra kulstoffet, når det henfalder. Ved at trække linjer langs den udsendte strålings spor (såkaldte responslinjer), afsløres diamanterne indeni klippestykkerne som lysende områder, mens transportbåndet kører.

Figuren nederst til højre viser et eksempel på en detektion af en diamant i et stykke kimberlit. Diamanten ses som en lysende plet.

Øverst til højre ses en principtegning af en fuld MinPET-facilitet, hvor kimberlitten knuses, bestråles, scannes og til sidst sorteres, så kun de stykker, der rent faktisk indeholder diamanter, sendes videre til omhyggelig udvinding af det kostbare materiale.



Principskitse af konceptet i en MinPET-facilitet.



finde store diamanter i vandløb og andre steder, hvor naturens slid og erosion gennem årtusinder har udvasket diamanterne. Men sandsynligheden for at finde store diamanter på den måde er meget lille.

Omkostningerne ved at behandle kimberlit er omkring 150 kr. per ton, og man finder typisk, men med betydelig variation afhængig af minen, lidt under én karat (0,2 g) diamant per ton. Den globale produktion var i 2015 opgjort til 127 millioner karat, hvilket svarer til, at omkring 100 millioner tons klippe er blevet knust, med et nyttigt resultat på altså 0,0000002%. En industriel nål i en høstak. Rådiamanterne gav i 2015 en global omsætning på ca. 100 milliarder kr. med en omtrentlig pris – igen med en markant variation afhængig af størrelsen – på et par tusinde kroner per karat.

Traditionelt karakteriserer man diamanter ved fire egenskaber, som er

farve, udskæring/slibning, klarhed, karat (vægt, målt i enheder af 0,2 g). Prisen er så afledt af disse fire egenskaber. Imidlertid er prisen ikke blot direkte proportional med vægten af diamanten, dvs. dens antal karat, men snarere er prisen *per karat* ligefremt proportional med antal karat, hvorved prisen for diamanter vokser kraftigt med vægten. Som eksempel er en 10 karat diamant således ca. 10 gange dyrere end 10 stk. 1 karat diamanter på trods af, at de vejer det samme tilsammen.

Det kan altså betale sig at finde de store diamanter! En 5 karat diamant (1 g) af den rette kvalitet kan gå for en pris så høj som 65 millioner kroner.

Detektion af diamanter på samlebånd

Igennem en længere årrække har denne artikels forfattere været involveret i at udvikle en ny metode

kaldet MinPET til at finde diamanter. Metoden går kort fortalt ud på at "spotte" diamanten i en mindre, måske 10 cm, stor klippeblok ved hjælp af en kombination af en kraftig elektron-accelerator og en PET-scanner (PET står for positron-emissions-tomografi). Herved kan man frasortere de meget få interessante blokke, som indeholder en diamant, og med omhu ekstrahere diamanten uden at gøre skade på den. På den måde vil man både kunne finde flere store diamanter og spare store mængder energi og vand, som man ellers skulle bruge på forgæves søgninger.

Oprindelig er MinPET-metoden udviklet og patenteret af den sydafrikanske fysiker Friedel Sellschop, berømt for et af de første neutrino-eksperimenter i en sydafrikansk mine. I de seneste år har hans videnskabelige arvtager, Simon Connell, været drivkraften bag udviklingen af et koncept for en

Diamant – et fremragende materiale

Diamanter har en række fremragende egenskaber. Det er det materiale, der har den højeste hårdhed (de kan modstå tryk på op til 6 mio. atmosfære) og den højeste varmeledningsevne. Derudover har de et meget højt brydningsindeks, der giver dem evnen til at "finkle", dvs. sprede farverne i hvidt lys meget kraftigt. Den ekstreme hårdhed har givet dem deres navn afledt af det græske ord, der på engelsk er blevet til *adamant*, som betyder utæmmelig eller ubøjelig (nogle læsere vil måske her genkende navnet fra den engelske rockmusiker Adam Ant fra begyndelsen af 80'erne, der givetvis har spillet på tvetydigheden). At deres varmeledningsevne er klart højere end andre materialers bliver blandt andet udnyttet af smykkehandlere til at skelne mellem den ægte vare og kopier baseret på andre materialer. Diamanter reagerer i øvrigt ikke på stærke baser eller syrer og er desuden vandskyende, men dog ikke fedtafvisende – snarere tiltrækkende – hvorfor det kan være en god



Diamantkrystal i kimberlit fra Sydafrika. Diamanten har en størrelse på 6,51 mm. Foto. Shutterstock.

ide at tage diamantringen af, når man laver mad ;-)

Diamanternes farver oprinder fra bittesmå koncentrationer (millionte dele) af urenheder. For eksempel giver nitrogen en gul farve, mens bor giver diamanten et blåt skær.

På grund af diamanters meget kompakte krystalgitterstruktur,

usædvanlige modstandsdygtighed mod bestråling og uovertrufne varmeledningsevne, bliver de ofte benyttet indenfor forskningen. Også af denne artikels forfattere, som ad flere omgange har benyttet dem til eksperimenter på det fælles europæiske fysikforskningscenter CERN. Det er også baggrunden for, at vi har fået kontakt til MinPET-metodens ophavsmænd.

MinPET-facilitet i samarbejde med diamantholdige selskaber. Konceptet for en sådan MinPET-facilitet er overordnet, at en maskine først knuser malmen til stykker af højst 10 cm størrelse, hvorefter et transportbånd bringer stenene ned i en såkaldt bestrålingstragt, hvor malmen bestråles. Herefter kommer malmen til "akkumuleringstragt", hvor malmen opbevares i cirka 20 minutter. Til sidst kommer malmen ud på et transportbånd, hvor selve PET-detektionen foregår – stort set som på en bagage-scanner i en lufthavn – og derved kan den mulige diamantholdige blok sorteres fra til senere ekstraktion af diamanten.

Aktivering af kulstof afslører diamanten

MinPET-teknikken bygger på at aktivere kulstofholdigt materiale (diamanter) i kimberlitten, så det kan detekteres med en PET-skan-

ner. Samtidig skal man så vidt muligt undgå at aktivere andre grundstoffer. Det skal man dels for at undgå at forstyrre detektionen af diamanterne, dels for at undgå at aktivere langlivede isotoper, som kan gøre restproduktet af kimberlit til et nyt miljøproblem. Det er desuden essentielt, at diamanterne ikke efter bestrålingen vil indeholde elementer, der kan afgive målelig stråling, idet man naturligvis ikke er interesseret i efterfølgende at bestråle den lykkelige diamanter-ejer.

Gruppen fra Sydafrika har studeret flere muligheder for at detektere diamanter i klippeblokke, og den mest lovende synes at være beskydning af kulstof med gammastråler. Herved omdannes kulstof-12 til kulstof-11, der henfalder under udsendelse af en positron, et henfald med en halveringstid på cirka 20 minutter. Når de udsendte positroner mødes med

en elektron omdannes de (man siger at partiklerne annihilere), hvorved der udsendes to modsatrettede gammastråler. Disse kan detekteres ganske på samme måde, som man gør i et PET-kamera.

Position og retning samt flyvetid bestemmer moderkernens position med en nøjagtighed mindre end en millimeter. Denne proces kræver dog ultrahurt signal- og databehandling, idet transportbåndets hastighed på 1 m/s ikke tillader mere end 5-6 sekunders beslutningstid for at afgøre, om klippestykket skal bortskaffes eller undersøges nærmere. Samtidig kræves en høj sandsynlighed for detektion med en minimal fejlrate. Det sikres til dels gennem et højt signal/støj forhold på mindst 75:1, som i skrivende stund er opnået for diamanter over 4 mm (ca. en halv karat) i kimberlitstykker med en diameter på 10 cm.

Radiofrekvensaccelerator til MinPET

En radiofrekvensaccelerator består i alt væsentligt af tre elementer: 1) en elektronkatode, 2) en radiofrekvensgenerator og 3) en serie af hulrumresonatorer. Med et konstant elektrisk felt på måske 100 kV ekstraheres elektroner fra katoden, der kan være en glødetråd. Selve energien til accelerationen kommer fra en radiofrekvensgenerator og forstærker, en slags radiosender. Faktisk bruges ofte kommercielle radiosendere i accelerators, for eksempel i FM-båndet omkring 100 MHz, da disse jo er udviklet til produktion i et stort antal og dermed er pålidelige og billige.

Til MinPET vil man i praksis nok vælge en frekvens i 3 GHz-området, altså mikrobølger. En elektromagnetisk bølge fra en sådan sender består af et svingende transversalt elektrisk (og magnetisk) felt, der ikke i sig selv kan accelerere. Men man kan designe og bygge såkaldte hulrumresonatorer, og ved at koble den elektromagnetiske bølge ind i en sådan resonator kan man opnå en effektiv longitudinal acceleration, når de ladede partikler løber gennem resonatoren. Denne "tønde" med hul i begge ender til partikelstrålen er lavet i et ledende materiale som kobber eller endnu bedre et superledende materiale. Resonatorens form optimeres således, at resonatoren naturligt har sin resonansfrekvens ved den valgte frekvens for accelerationen.

Ved hjælp af ovennævnte princip, og ved at koble flere resonatorer i



En lineær-radiofrekvensaccelerator.



Vores "mikrotron" på Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet, som vi har brugt til eksperimenterne, der skal bane vejen for en fremtidig "diamant-maskine".

forlængelse af hinanden, kan man opnå en energitilvækst på adskillige MeV per meter for kobberresonatorer og adskillige 10 MeV per meter for superledende resonatorer. En MinPET-accelerator kan derfor bygges med dimensioner på forholdsvis få meter og for eksempel være i en container, ligesom selve senderen og andet elektronik vil kunne være i en anden. Der er selvfølgelig også brug for flere andre komponenter i en sådan accelerator, fra måleudstyr til observation og optimering af partikelstrålen til så lav-praktiske,

men nødvendige, ting som vakuum og kølevand.

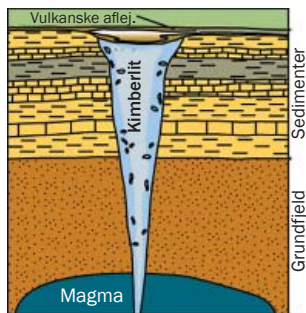
En lineær radiofrekvensaccelerator leverer en elektronstråle, der er af unødvendig god kvalitet til brug i MinPET, både hvad angår energispredning og fysisk størrelse. Det er imidlertid ikke klart, hvordan man eventuelt kunne opnå en billigere accelerator, også selvom man er villig til at reducere strålens kvalitet. Derfor vil man være nødt til at sprede strålen over det område, der skal bestråles.

Da også andre kerner i kimberlitten som nævnt kan aktiveres, opbevares de bestrålede sten i ca. 20 minutters tid, hvorved kortlivede isotoper henfalder. Specielt bliver indholdet af ilt-15, der har en halveringstid på 2 minutter, reduceret drastisk. Ilt er naturligt forekommende i kimberlit, og en del af de stabile isotoper omdannes til ilt-15 ved bestråling med gammastråler.

Kunsten at vælge den rigtige accelerator

Sandsynligheden for, at kulstof-12 omdannes til kulstof-11, er specielt høj ved bestråling i energiområdet 20-30 MeV (MeV = mega-elektronvolt). En opgave, som vi her på Aarhus Universitet har været involveret i, er derfor at finde den mest effektive måde at producere gammastråler i netop dette energiområde. Det

viser sig, at en elektronaccelerator med en energi på 40 MeV er den bedste kandidat til at lave højenergetiske fotoner i 20-30 MeV området via den såkaldte bremsestråling, der udsendes, når en elektron vekselvirker med et materiale. For at behandle en stor mængde kimberlit – op til 1000 tons i timen for en testfacilitet, mens en produktionsfacilitet skal kunne undersøge



Skematisk illustration af et kimberlit-rør, som er en vulkansk struktur og vores kilde til diamanter.



Diamantminen Mir i Yakutsk, Rusland. Minen er ikke længere aktiv. Foto: Shutterstock.

Videre læsning:

H. Knudsen og U.I. Uggerhøj: Antipartikler, *Aktuel Naturvidenskab* vol. 6, 7 (2001)

M.D. Lund, H.D. Thomsen, U.I. Uggerhøj og H. Knudsen: Atom nummer nul, *Aktuel Naturvidenskab* maj, (2009)

10 gange så meget materiale – skal der bygges en accelerator med stor effekt.

Opgaven er nu for acceleratorkonstruktøren at bygge en 40 MeV elektronaccelerator, der kan levere en væsentlig effekt til elektronstrålen, 5 kW til en mindre testfacilitet og måske 100 kW eller mere til en fremtidig storskala-facilitet. De cirka 40 MeV, der er nødvendige i MinPET, kan ikke opnås med højspænding, men der findes i dag i det væsentlige to typer vekselspændingsacceleratorer, der kan levere den nødvendige effekt.

Den ene type er en såkaldt beta-tron-accelerator, som i dag – så vidt vi ved – kun produceres kommercielt til inspektionsformål i olie- og gasrørledninger, hvor en robust accelerator til brug "i felten" er nødvendig. Selvom disse er forholdsvis billige og kan producere elektroner i det rigtige energiområde, er de dog problematiske, blandt andet fordi de har forholdsvis store strålingstab og dermed en meget begrænset levetid.

Den anden type accelerator, som

dermed er det bedste bud, vi har i dag på en accelerator til MinPET, er en såkaldt lineær radiofrekvens-accelerator, meget lig de accelerato-rer, der i dag bygges til forsknings-mæssig, industriel og medicinsk brug. Flere firmaer er stand til at levere en sådan 40 MeV accelera-tor med en effekt af elektronstrå-len på op til 100 kW eller mere. Optimeringen af et indkøb vil både i prototypefaciliteten, men også i den endelige facilitet, handle om økonomi, men også sikkerhed, drift og vedligeholdelse on-site i en mine langt fra byer. Selvom det meste af den producerede og inducerede stråling henfalder forholdsvis hurtigt og fordeles på tusindvis af tons af klippeblokke, så vil en lille del af strålingen tabes i selve accelera-toren, som jo skal kunne serviceres og repareres.

De næste skridt

Status på projektet er i dag, at vi har afklaret komponenterne til en MinPET, specielt hvad angår bestråling med en accelerator med optimalt valgt energi. Den endelige accelerator skal dog kunne levere en meget større effekt af partikel-strålen, således at store mæng-

der af materiale kan bestråles på kort tid. Desuden er det blevet demonstreret, at PET-detektion kan ske effektivt med tilstrækkelig lille baggrundssignal fra andre isoto-per, og at restproduktet af klippe til efterfølgende bortskaftelse er tilstrækkeligt uskadeligt med kun kortlivede isotoper. Eksperimen-ter ved acceleratoren ASTRID på Aarhus Universitet har endvidere vist, at der ikke er en detekterbar rest af radioaktivitet i den fundne diamant.

Næste trin er at teste en demon-strationsmodel af en fabrik i lille skala, der forventes at skulle in-volvere en 40 MeV elektronstråle med en effekt på omkring 5-10 kW. Dette trin skal give en overbevisen-de økonomisk demonstration, før man bygger en fuldskalafacilitet i forbindelse med en stor mine.

MinPET er som sådan et fint ek-sempel på, at viden opnået gennem grundvidenskabelige eksperimenter indenfor højenergifysik ved fx Aarhus Universitet og CERN kan give afkast indenfor de kommende år i form af mere miljøvenlig og mere effektiv eftersøgning af diamanter. ■