



(12) PATENT

(19) NO

(11) 337868

(13) B1

NORGE

(51) Int Cl.

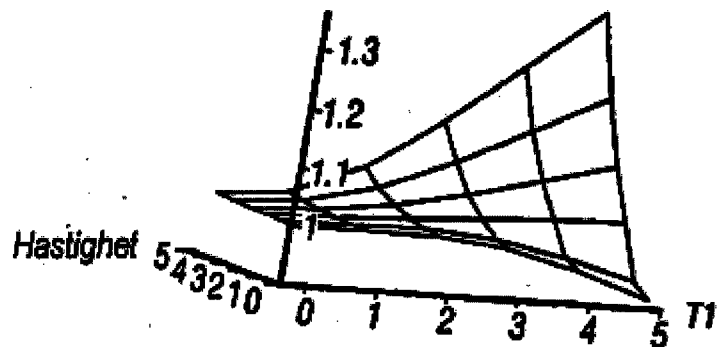
G01V 3/32 (2006.01)

Patentstyret

| | | | | | |
|------|------------|---|------|---------------------------|--------------------------------|
| (21) | Søknadsnr | 20071268 | (86) | Int.inng.dag og søknadsnr | 2005.08.11 PCT/US2005/28421 |
| (22) | Inng.dag | 2007.03.08 | (85) | Videreføringsdag | 2007.03.08 |
| (24) | Løpedag | 2005.08.11 | (30) | Prioritet | 2004.08.16, US, 10/918,965 |
| (41) | Alm.tilgj | 2007.05.14 | | | |
| (45) | Meddelt | 2016.07.04 | | | |
| (73) | Innehaver | Baker Hughes Incorporated, P.O. Box 4740, US-TX77210-4740 HOUSTON, USA | | | |
| (72) | Oppfinner | Martin Blanz, Dörrigsgarten 7, DE-29221 CELLE, Tyskland Holger F Thern, Oisseler Strasse 11, DE-30559 HANNOVER, Tyskland | | | |
| (74) | Fullmektig | Bryn Aarflot AS, Postboks 449 Sentrum, 0104 OSLO, Norge | | | |

| | | | | |
|------|-----------------------|--|--|--|
| (54) | Benevnelse | Fremgangsmåte og anordning for behandling av kjernemagnetiske resonans-signaler fra en grunnformasjon | | |
| (56) | Anførte publikasjoner | US 2002153888 A WO 03016953 A | | |
| (57) | Sammendrag | | | |

NMR-spinnekkosignaler blir korrigert for aksial bevegelse av loggeverktøyet i borehullet. En ytterligere korreksjon utføres for å korrigere for ufullstendig polarisering av kjernespinnet på grunn av utilstrekkelig ventetid mellom pulsekvenser.



BAKGRUNN FOR OPPFINNELSEN

1. Teknisk område

5 [0001] Foreliggende oppfinnelse vedrører generelt bestemmelse av geologiske egenskaper ved undergrunnsformasjoner ved bruk av kjernemagnetisk resonans-metoder ("NMR"-metoder) for logging av borehull, spesielt for å korrigere for effektene av verktøybevegelse og pulssekvensstidsstyring av NMR-signaler.

2. Beskrivelse av beslektet teknikk

10 [0002] En rekke teknikker blir for tiden benyttet til å bestemme forekomsten og estimering av mengder med hydrokarboner (olje og gass) i grunnformasjoner. Disse fremgangsmåtene er utformet for å bestemme formasjonsparameter, innbefattende blant annet resistiviteten, porøsiteten og permeabiliteten til bergartsformasjonene omkring brønnhullet som er boret for å utvinne hydrokarbonene. Verktøyene som er
15 konstruert for å tilveiebringe den ønskede informasjonen, blir typisk brukt til å logge brønnhullet. Mye av loggingen blir gjort etter at borehullene er blitt boret. I den senere tid er borehull blitt logget under boring, som kalles måling-under-boring (MWD) eller logging-under-boring (LWD).

20 [0003] En vanlig brukt teknikk innebærer å benytte kjernemagnetiske resonans-loggeverktøy og fremgangsmåter til å bestemme blant annet porøsitet, hydrokarbonmetning og permeabilitet for bergartsformasjonene. NMR-loggeverktøyene blir benyttet til å eksitere kjernene i væskene i de geologiske formasjonene som omgir borehullet, slik at visse parametere slik som kjernespinndensitet, langsgående relaksasjonstid (vanligvis referert til som T_1) og transversal relaksasjonstid (vanligvis referert til som T_2) for de geologiske formasjonene kan måles. Fra slike målinger blir
25 porøsitet, permeabilitet og hydrokarbonmetning bestemt, noe som gir verdifull informasjon om sammensetningen av de geologiske formasjonene og mengden med utvinnbare hydrokarboner. US 2002/0153888 A1 (US 6,727,696 B2) omhandler nedihulls NMR-prosessering.

30 [0004] NMR-verktøyene genererer et statisk magnetfelt i et område av interesse som omgir borehullet. NMR er basert på det faktum at kjernene i mange elementer har vinkelmessig moment (spinn) og et magnetisk moment. Kjernene har en karakteristisk Larmor-resonansfrekvens relatert til størrelsen av magnetfeltet i sin nærhet.

Over tid innretter kjernespinnene seg langs et eksternt påtrykt, statisk magnetfelt for å skape en netto magnetisering. Denne likevektssituasjonen kan forstyrres av puls fra et oscillerende magnetfelt som tipper spinnene med resonansfrekvens innenfor båndbredden til det oscillerende magnetfeltet bort fra den statiske feltretningen.

5 Vinkelen θ , som spinnene nøyaktig blir tippet ved resonans, er gitt av ligningen:

$$\theta = \gamma B_1 t_p / 2 \quad (1)$$

10 hvor γ er det gyromagnetiske forholdet, B_1 er den magnetiske fluksdensitetsamplituden til det sinusformede oscillerende feltet og t_p er varigheten av RF-pulsen.

[0005] Etter tipping, preseserer spinnene omkring det statiske feltet ved en spesiell frekvens kjent som Larmor-frekvensen ω_0 gitt ved

$$\omega = \gamma B_0 \quad (2)$$

15 hvor B_0 er den statiske magnetfluksdensiteten. For hydrogenkjerner er $\gamma/2\pi=4258$ Hz/Gauss, slik at et statisk felt på 235 Gauss vil frembringe en presesjonsfrekvens på 1 MHz. Samtidig vender magnetiseringen tilbake til likevektsretningen (dvs. innrettet med det statiske feltet) i henhold til en hendøingstid kjent som "spinn/gitter-relaksasjonstiden" eller T_1 . T_1 blir styrt av det molekylære miljøet og er typisk fra 10 til 1000 ms i bergarter.

20 **[0006]** Ved slutten av en tippepuls $\theta = 90^\circ$ peker spinn ved resonans i en felles retning perpendikulært til det statiske feltet, og de preseserer ved Larmor-frekvensen. På grunn av inhomogenitet i det statiske feltet som skyldes begrensninger på verktøyform, uperfekt instrumentering eller mikroskopiske materialheterogeniteter preseserer hvert kjernespinn ved en litt forskjellig hastighet. Etter en tid som er lang sammenlignet med presesjonsperioden, men kortere enn T_1 , vil dermed spinnene ikke lenger presesere i fase. Denne defasingen inntreffer med en tidskonstant som vanligvis kalles T_2^* . Defasing på grunn av inhomogenitet i det statiske feltet kan oppdages ved å generere spinnekk (se nedenfor). Den gjenværende defasingen er karakterisert ved tidskonstanten T_2 og skyldes egenskaper ved materialet.

30 **[0007]** En mottakerspole er utformet slik at en spenning blir indusert av preseseringsspinnene. Bare den komponenten av kjernemagnetiseringen som preseserer i det

plan som er perpendikulært til det statiske feltet, blir avfølt av spolen. Etter en tippepuls på 180° (en "inverteringspuls") er spinnene med resonans innrettet motsatt av det statiske feltet og magnetiseringen relaxerer langs den statiske feltaksen til likevektsretningen. Et signal vil dermed bli generert etter en tippepuls på 90° , men ikke etter en 180° tippepuls i et generelt uniformt magnetfelt.

[0008] Selv om mange forskjellige fremgangsmåter for måling av T_1 er blitt utviklet, har det utviklet seg en enkelt standard kjent som CPMG-sekvensen (Carr-Purcell-Meiboom-Gill) for måling av T_2 . I motsetning til NMR-laboratiemagneter har brønnloggingsverktøy inhomogene magnetfelter på grunn av begrensningene med hensyn til plassering av magnetene inne i et rørformet verktøy og den iboende "innside-utgeometrien". Maxwells divergensteorem bestemmer at det ikke kan være et område med høy homogenitet på utsiden av verktøyet. I typiske borehull er derfor $T_2^* \ll T_2$, og den frie induksjonshendøingen blir et mål på de apparatinduserte inhomogenitetene. For å måle den virkelige T_2 i slike situasjoner, er det nødvendig å kansellere effekten av de apparatinduserte inhomogenitetene. For å gjennomføre dette blir en rekke pulser påtrykt for gjentatte ganger å refokusere spinnsystemet, kansellere T_2^* -effektene og for å danne en rekke spinnekk. Hendøingen av ekkoamplitude er et virkelig mål på den hendøing som skyldes materialeegenskaper. Videre kan det vises at hendøingen eller dempningen i virkeligheten er sammensatt av et antall forskjellige dempningskomponenter som danner en T_2 -fordeling. Ekkodempningsdataene kan behandles for å avdekke denne fordelingen som er relatert til bergartens porestørrelsesfordeling og andre parametere av interesse for brønnlogganalytiker.

[0009] Verktøybevegelse kan påvirke ytelsen til NMR-verktøy som brukes i et MWD-miljø i alvorlig grad. NMR-verktøy som har statiske magnetfelter med fullstendig rotasjonssymmetri, er upåvirket av rotasjon av verktøyet siden feltene i undersøkelsesområdet ikke endrer seg under målesekvensen. Enhver aksial eller transversal (ortogonal til verktøyaksen) komponent av verktøybevegelse på grunn av vibrasjon, vil imidlertid påvirke NMR-signalet.

[0010] Det er mange velkjente bevegelsesartefakter som viser seg i signaler ved brønnhullslogging. Disse artefaktene er teoretisk ventet og skyldes slike faktorer som rotasjon, transversal vibrasjon og aksial bevegelse. I tillegg til disse bevegelsesartefaktene kan NMR-signalamplituden reduseres på grunn av utilstrekkelig ventetid for polarisering etter slutten av en ekkosekvens.

[0011] Artefakter av rotasjon er et resultat av det typisk stasjonære B_0 -feltet til det systemet som ikke er fullstendig aksesympmetrisk. Rotasjon av borestrengen forårsaker derfor (periodisk) NMR-signaltap under et spinnekkotog. Artefakter fra transversale vibrasjoner inntreffer generelt på grunn av boring eller på grunn av slam-sirkulasjon gjennom en slammotor. Det fremskaffede vibrasjonsfrekvensspekteret innbefatter vanligvis noen dominerende frekvenser som er direkte relatert til rotasjonshastigheten til motoren eller borestrengen.

[0012] Aksial bevegelse av borestrengen gir opphav til to distinkte artefakter. En første artefakt fra aksial bevegelse blir forårsaket av bevegelsen av borestrengen gjennom borehullet. Inntrengningshastigheten (ROP) til borestrengen kan registreres elektronisk og senere innhentes fra en datafil. Det er tydelig at ROP ved borkronen er litt forskjellig fra den elektronisk registrerte verdien av ROP som er målt på overflaten. Dette avviket mellom ROP-verdier skyldes begrenset tidsoppløsning av datafilen så vel som fleksibiliteten til borestrengen. En annen artefakt for aksial bevegelse viser seg som aksiale vibrasjoner ved høyere frekvens. Disse vibrasjonene kan måles med et akselerometer i NMR-verktøyet.

[0013] Påføring av en utilstrekkelig ventetid mellom påfølgende pulssekvenser kan gi opphav til nok en annen artefakt. Etter slutten av en ekkosekvens fremskaffet med aksial rotasjon av borestrengen, er vanligvis z-magnetiseringen hovedsakelig lik null. Denne z-magnetisering er vanligvis forskjellig fra null når ingen slik bevegelse finnes. En ventetid blir vanligvis påført etter en ekkosekvens for å tillate protonene å gjeninnrette seg langs retningen til det statiske magnetfeltet. Denne ommagnetiseringen inntreffer med en karakteristisk relaksasjonstid kjent som spinn / gitter-relaksasjonstiden T_1 . Vanligvis finnes det en fordeling av T_1 -tider i likhet med den velkjente T_2 -fordelingen.

[0014] US-patent 5,389,877 utstedt til *Sezginer*, beskriver en avkortet CPMG-sekvens hvor frekvensvarigheten og gjenvinningsforsinkelsen er så kort at bare signaler fra de leire- og kapillarbundne fluidene blir detektert. En avkortet sekvens har den fordel at effekten av verktøybevegelse på målingene blir redusert på grunn av kort måletid (omkring 50 ms, sammenlignet med mer enn 300 ms for normale CPMG-brønnhullsmålinger). Som beskrevet i US-patent 5,705,927 utstedt til *Kleinberg*, er resonansområdene for mange tidligere kjente instrumenter i størrelsesorden 1 mm. En lateral vibrasjon ved en frekvens på 50 Hz med en amplitude på 1

mm (10 g akselerasjon) ville følgelig sette instrumentet ut av spill. '927-patentet til *Kleinberg* beskriver hvordan lengden av hver CPMG-sekvens kan gjøres liten, f.eks. 10 ms, slik at vektrøret ikke kan forskyves med en betydelig andel av den vertikale eller radiale utstrekningen av det følsomme område under en CPMG-pulssekvens.

5 Som nevnt ovenfor, gir imidlertid bruk av slike korte sekvenser og korte ventetider en indikasjon på det bundne fluidvolumet og gir ingen indikasjon på det totale fluidvolumet.

[0015] US-patent nr. 6,268,726 til *Prommer* mfl., beskriver bruk av bevegelses-sensorer på en MWD-anordning som tar målinger av verktøybevegelse for en NMR-sensorenhet. Målinger blir tatt av NMR-sensoren under fortsatte boringsoperasjoner og deretter blir målingene tatt av bevegelsessensoren brukt til å velge et delsett av NMR-målingene som oppfyller visse krav til verktøybevegelse, og som dermed vil ventes å gi en rimelig ufølsomhet med hensyn til verktøybevegelse. US-patent 6,459,263 til *Hawkes* mfl., som har samme søker som foreliggende søknad og hvis 10 innhold herved i sin helhet inkorporeres ved referanse, bruker utgangen fra bevegelsessensorene i kombinasjon med prediktiv filtrering til å styre tidsbestemmelsen av pulser for en modifisert (som i '013-patentet til *Hawkes* eller konvensjonell CPMG-sekvens.

[0016] US-patent 6,566,874 til *Speier* mfl., beskriver flere løsninger for å håndtere 20 problemer i forbindelse med verktøybevegelse. I en utførelsesform blir målinger tatt av to forskjellige ekkotog som har forskjellige følsomheter i forhold til verktøybevegelse. Et verktøy blir brukt som har to forskjellige undersøkelsesområder: en høygradientzone definert av et sett med magneter og antenner, og en lavgradientzone definert av et annet sett med magneter og antenner. Virkningen av verktøybevegelse på signalamplituden er større i høygradientsonen enn i lavgradientsonen. 25 Ved å bruke disse to settene med signaler og kjenne gradientene til de respektive sonene, blir det mulig å estimere hva signalet ville ha vært uten verktøybevegelsen. '874-*Speier*-patentet beskriver også at følsomheten overfor bevegelse kan variere med forskjellige feltgeometrier med forskjellige gradienter. Dette behovet for å ha to forskjellige undersøkelsesområder kompliserer utstyret. En annen ulempe (som er 30 nevnt i *Speier* '874) med de ovenfor beskrevne teknikkene er at målingene må separeres i tid og/eller rom. For å tolke resultatene blir det antatt at i fravær av bevegelse, NMR-signalet (og derfor den målte formasjonen) er den samme i begge

målinger. For et kontinuerlig bevegelig loggeverktøy er denne tilstanden ikke alltid gitt. Også bevegelse under de to målingene bør være den samme eller i det minst ha samme karakteristikk.

5 **[0017]** I en annen utførelsesform, beskrevet av *Speier '874*, blir målingene behandlet for å oppnå både T_1 - og T_2 -fordelingen. Virkningen av verktøybevegelse er forskjellig på de to typer målinger. Denne løsningen har minst to ulemper. Den første er at T_1 -bestemmelsen er tidkrevende. En annen ulempe er at i fravær av nøyaktig kjennskap til forholdet T_1/T_2 , kan fremgangsmåten bare brukes for kvalitetskontroll og ikke til å bestemme både T_1 - og T_2 -fordelingene.

10 **[0018]** Det er behov for beregningsmetoder for å redusere virkningene av bevegelsesartefakter som påtreffes ved MWD-testing. Fremgangsmåten bør korrigere NMR-signaler for (konstant) ROP så vel som utilstrekkelig ventetid ved MWD-testing. Denne fremgangsmåten bør kunne kombineres med andre metoder for bevegelseskorreksjoner eller metoder som reduserer bevegelsesartefakter. Fremgangsmåten
15 bør kunne brukes i forbindelse med standard pulssekvenser som er kjent på området.

OPPSUMMERING AV OPPFINNELSEN

20 **[0019]** Hovedtrekkene ved oppfinnelsen fremgår av de selvstendige patentkrav. Ytterligere trekk ved oppfinnelsen er angitt i de uselvstendige krav. Foreliggende oppfinnelse vedrører en fremgangsmåte og en anordning for behandling av kjernemagnetiske resonans-signaler (NMR-signaler) for en grunnformasjon. NMR-verktøyet blir transportert inn i et borehull i grunnformasjonen og beveges med aksial hastighet i borehullet. Kjernespin i grunnformasjonene blir polarisert. En antenne på
25 NMR-loggeverktøyet blir pulset med en pulssekvens for å frembringe spinnekkosignaler. Pulssekvensen innbefatter en eksitasjonspuls og et antall refokuseringspulser. Spinnekkosignalene blir korrigert ved å bruke en funksjon av hastigheten for å gi korrigerede spinnekkosignaler. NMR-loggeverktøyet kan transporteres inn i borehullet i en kabel, en glattkabel, en borestreng eller et opp-
30 kveilingsrør. Korreksjonen kan implementeres ved å skalere spinnekkosignalene ved hjelp av en normaliseringsfunksjon relatert til den aksiale hastigheten og en referansehastighet. Korreksjonsfaktoren kan anvendes på fasekomponenten,

kvadraturkomponenten eller på amplituden til spinnekkosignalene. Den første korreksjonen kompenserer for én type effekter forårsaket av verktøybevegelse.

[0020] I en utførelsesform av oppfinnelsen blir et antall pulssekvenser påført med en ventetid mellom dem. En annen korreksjon kan påføres for å kompensere for den alt for store formagnetiseringen og også for utilstrekkelig ventetid som ikke vil muliggjøre full magnetisering av kjernene som brukes til NMR. Denne andre korreksjonen kan være i tillegg til eller utføres uavhengig av den første korreksjonen. Den andre korreksjonen blir beregnet for de longitudinale relaksasjonsverdiene som svarer til gruppene av T_2 -fordelingen. Korreksjon B blir så utført ved å multiplisere hver gruppe i T_2 -fordelingen med dens B-korreksjonsfaktor. Resultatet er en T_2 -fordeling hvor konstante, aksiale hastighetsartefakter og utilstrekkelig gjenvinningstids-artefakter er blitt eliminert.

KORT BESKRIVELSE AV TEGNINGENE

[0021] Foreliggende oppfinnelse vil bli best forstått under henvisning til de etterfølgende figurer hvor like henvisningstall refererer til like elementer, og hvor:

Fig. 1 (kjent teknikk) viser et verktøy for måling-under-boring egnet for bruk i forbindelse med foreliggende oppfinnelse;

Fig. 2 (kjent teknikk) viser en sensorseksjon av en anordning for måling-under-boring egnet for bruk i forbindelse med foreliggende oppfinnelse;

Fig. 3 viser en typisk pulssekvens som kan brukes i forbindelse med foreliggende oppfinnelse;

Fig. 4 viser seks NMR-spinnekkodemplingskurver oppnådd ved forskjellige aksiale bevegelser av en borestreng gjennom en formasjon;

Fig. 5 viser resultatene av en kompresjon av den horisontale akselen på fig. 4;

Fig. 6 viser simuleringer oppnådd med en uendelig T_2 -dempning;

Fig. 7 viser simuleringer ved bruk av en RF-strømamplitude som er forskjellig fra den som brukes på fig. 6;

Fig. 8 viser effekten av påføring av en korreksjonsfunksjon ifølge foreliggende oppfinnelse for simulering med endelig T_2 ;

Fig. 9 viser 2 ORPS-sekvenser generert med en ventetid TW;

Fig. 10 viser et laboratorieeksempel på ekkodemplinger frembrakt ved å bruke den andre ORPS-sekvensen fra fig. 9;

Fig. 11 viser bruken av en aperiodisk pulssekvens (APS);

Fig. 12 viser effekten av hyperpolarisering og utilstrekkelig ventetid;

Fig. 13 viser feilen ved tilpasset korreksjon B;

Fig. 14 viser et flytskjema for foreliggende oppfinnelse i nærvær av en T_1 -fordeling; og

Fig. 15 viser en simulering av NMR-data ved bruk av en APS-sekvens (fig. 1) og påført korreksjoner A og B.

DETALJERT BESKRIVELSE AV OPPFINNELSEN

10 **[0022]** Fig. 1 viser et skjematisk diagram av et boresystem 10 med en borestreng 20 som bærer en boringsenhet 30 (også kalt bunnhullsordeningen eller "BHA") transportert i et "brønnhull" eller "borehull" 26 for boring av borehullet. Boresystemet 10 innbefatter et konvensjonelt tårn 11 reist på et dekk 12 som understøtter et rotasjonsbord 14 som blir rotert ved hjelp av en drivanordning slik som en elektrisk

15 motor (ikke vist) med en ønsket rotasjonshastighet. Borestrengen 20 innbefatter en rørledning slik som et borerør 22 eller et oppkveilingsrør som strekker seg nedover fra overflaten inn i borehullet 26. Borestrengen 20 blir skjøvet inn i borehullet 26 når et borerør 22 blir brukt som rørledning. For oppkveilingsrør blir imidlertid en rør-injektor, slik som en injektor (ikke vist) brukt til å bevege rørledningen fra en kilde for

20 denne, slik som en spole (ikke vist) til borehullet 26. Borkronen 50 som er festet til enden av borestrengen, bryter opp de geologiske formasjonene når den blir rotert for å bore borehullet 26. Hvis et borerør 22 blir brukt, blir borestrengen 20 koplet til et heiseverk 30 via et drivrørledd 21, en svivel 28 og line 29 gjennom en skive 23. Under boringsoperasjoner blir heiseverket 30 operert for å styre vekten på borkronen, som er en viktig parameter som påvirker inntrengningshastigheten.

25 Operasjonen av heiseverket er velkjent på området og blir derfor ikke beskrevet i detalj her. For formålet med denne oppfinnelse er det nødvendig å kjenne den aksiale hastigheten (inntrengningshastigheten eller ROP) til bunnhullsordeningen. Dybdeinformasjon og ROP kan kommuniseres ned i borehullet fra et sted på

30 overflaten. Alternativt kan den fremgangsmåten som er beskrevet US-patent 6,769,497 utstedt til *Dubinsky* mfl., som har samme søker som foreliggende patentsøknad og hvis innhold herved inkorporeres ved referanse, brukes. Fremgangsmåten til *Dubinsky* benytter aksiale akselerometere for å bestemme ROP. Under borings-

operasjoner blir et egnet borefluid 31 fra en slamgrop (kilde) 32 sirkulert under trykk gjennom en kanal i borestrengen 20 ved hjelp av en slampumpe 34. Borefluidet passerer fra slampumpen 34 inn i borestrengen 20 via trykkutjevningssanordning, (ikke vist) fluidledningen 38 og drivrørleddet 21. Borefluidet 31 kommer ut ved bunnhulls-
5 hullsanordningen 51 gjennom en åpning i borkronen 50. Borefluidet 31 sirkulerer opp gjennom ringrommet 27 mellom borestrengen 20 og borehullet 26 og returnerer til slamgropen 32 via en returledning 35. Borefluidet virker som smøring for borkronen 50 og brukes til å føre borekaks bort fra borkronen 50. En sensor S_1 som typisk er plassert i ledningen 38, leverer informasjon om fluidstrømningshastigheten. En
10 dreiemomentsensor S_2 og en sensor S_3 på overflaten i forbindelse med borestrengen 20, tilveiebringer henholdsvis informasjon om dreiemomentet og rotasjonshastigheten til borestrengen. I tillegg blir en sensor (ikke vist) i forbindelse med linen 29 brukt til å fremskaffe kroklasten til borestrengen 20.

[0023] I en utførelsesform av oppfinnelsen blir borkronen 50 rotert ved bare å rotere borerøret 22. I en annen utførelsesform av oppfinnelsen er en brunhullsmotor 55 (slammotor) anordnet i bunnhulls-
15 hullsanordningen 90 for å rotere borkronen 50 og borerøret 22 blir rotert på vanlig måte for å supplere rotasjonseffekten, om nødvendig, og å for å bevirke endringer i boreretningen.

[0024] I et utførelseseksempel på fig. 1, er slammotoren 55 koplet til borkronen 50 via
20 en drivaksel (ikke vist) anordnet i en lagerenhet 57. Slammotoren roterer borkronen 50 når borefluidet 31 passerer gjennom slammotoren 55 under trykk. Lagerenheten 57 understøtter de radiale og aksiale kreftene på borkronen. En stabilisator 58, koplet til lagerenheten 57, virker som en sentreringsanordning for den nedre del av slammotorenheten.

[0025] I en utførelsesform av oppfinnelsen, er en boresensormodul 59 plassert nær
25 borkronen 50. Boresensormodulen inneholder sensorer, kretser og behandlingsprogramvare og algoritmer vedrørende de dynamiske boringsparameterne. Slike parametere innbefatter typisk borkronestøt, lugging av boringsenheten, bakoverrotasjon, dreiemoment, støt, borehulls- og ringromstrykk, akselerasjonsmålinger og andre målinger av borkronetilstanden. En egnet telemetri- eller kommunikasjons-
30 modul 72 som f.eks. bruker to-veis telemetri, er også anordnet som illustrert i boringsenheten 90. Boresensormodulen behandler sensorinformasjonen og sender den til overflatestyringsenheten 40 via telemetrisystemet 72.

[0026] Kommunikasjonsmodulen 72, en kraftenhet 78 og et MWD-verktøy 79 er alle forbundet i tandem med borestrengen 20. Fleksible rør blir f.eks. brukt for å forbinde MWD-verktøyet 79 i boringsenheten 90. Slike moduler og verktøy danner bunnhulls-anordningen 90 mellom borestrengen 20 og borkronen 50. Boringsenheten 90 tar
5 forskjellige målinger innbefattet de pulsede kjernemagnetiske resonans-målingene mens borehullet 26 blir boret. Kommunikasjonsmodulen 72 fremskaffer signalene og målingene og overfører signalene ved å bruke to-veis telemetri, f.eks., for å bli behandlet på overflaten. Alternativt kan signalene behandles ved å bruke en brønnhullsprosessor i boringsenheten 90.

[0027] Overflatestyringsenheten eller prosessoren 40 mottar også signaler fra andre brønnhullssensorer og anordninger og signaler fra sensorene S_1 - S_3 og andre sensorer brukt i systemet 50 og behandler disse signalene i henhold til programmerte instruksjoner levert til overflatestyringsenheten 40. Overflatestyringsenheten 40 viser
10 ønskede boreparametere og annen informasjon på en visningsmonitor 42 som benyttes av en operatør til styring av boringsoperasjonene. Overflatestyringsenheten 40 innbefatter typisk en datamaskin eller et mikroprosessorbasert behandlingssystem, et lager for lagring av programmer eller modeller og data, en registreringsanordning for registrering av data samt andre periferenheter. Styringsenheten 40 er
15 vanligvis innrettet for å aktivere alarmer 44 når visse uttrykk eller uønskede driftsbetingelser inntreffer.

[0028] En egnet anordning for bruk i forbindelse med foreliggende oppfinnelse er beskrevet i US-patent nr. 6,215,304 til *Slade*, hvis innhold i sin helhet herved inkorporeres ved referanse. Det skal bemerkes at anordningen som er beskrevet av *Slade* kun er ment som et eksempel, og fremgangsmåten ifølge foreliggende oppfinnelse
25 kan benyttes i forbindelse med mange andre NMR-loggingsanordninger, og kan brukes for kabel så vel som MWD-anvendelser. Eksempler på slike anordninger er gitt i US-patentene 5,557,201 til *Kleinberg*, US 5,280,243 til *Miller*, US 5,055,787 til *Kleinberg* og US 5,698,979 til *Taicher*.

[0029] Det vises nå til fig. 2 hvor verktøyet har en borkrone 107 ved én ende, en
30 sensorseksjon 102 bak borehodet og elektronikk 101. Sensorseksjonen 102 omfatter en magnetfeltgenererende enhet for å generere et magnetfelt B_0 (som hovedsakelig er tidsinvariant over varigheten av en måling), og et RF-system for å sende og motta radiofrekvente (RF) magnetiske pulser og ekko. Den magnetfeltgenererende enheten

omfatter et par aksial atskilte hovedmagneter 103, 104 med motsatte polorienteringer (dvs. med like magnetiske poler vendende mot hverandre), og tre ferrittorganer 109, 110 aksialt anordnet mellom magnetene 103, 104. Ferrittorganene er laget av "bløt" ferritt som kan skjernes fra "hard" ferritt ved formen av BH-kurven som påvirker både intrinsikk koersivitet (H_j er skjæringen med H-aksen) og innledende permeabilitet (μ_i , gradienten til BH-kurven i det umagnetiserte tilfelle). μ_i -verdier for bløt ferritt ligger typisk i området fra 10 til 10000, mens hard ferritt har μ_i på omkring 1. Den bløte ferritten har derfor stor innledende permeabilitet (typisk større enn 10, fortrinnsvis større enn 1000). RF-systemet omfatter et sett med RF-senderantennen og RF-mottakerantennespolevindinger 105 anordnet som en sentral "feltdannende" solenoidgruppe 113 og et par ytre "koplingsstyrende" solenoidgrupper 114.

[0030] Verktøyet har et slamrør 160 med en klar sentral boring 106 og et antall utløpsåpninger 161-164 for å føre boreslam til borkronen 107, og hovedlegemet til verktøyet er forsynt med et vektrør 108. Boreslam blir pumpet ned gjennom slamrøret 160 ved hjelp av en pumpe 121 og returnerer omkring verktøyet og hele verktøyet blir rotert av en drivanordning 120. Oppkveilingsrør eller en borestreng kan brukes for å kople drivanordningen til brønnhullseneheten.

[0031] Vektrøret 108 tilveiebringer en fordypning 170 for RF-senderantennen og RF-mottakerantennespolevindingene 105. Gap i lommene mellom de bløte ferrittorganene er fylt med ikke-ledende materialer 131, 135 (f.eks. keramikk eller høytemperaturplast) og RF-spolene 113, 114 er så viklet over de bløte ferrittorganene 109, 110. De bløte ferrittene 109, 110 og RF-spoleenheten 113, 114 er trykkimpregnerert med en egnet harpiks for høy temperatur og med lav viskositet (ikke vist) for å forsterke systemet mot virkningene av vibrasjon, tetning mot borefluid ved brønntrykk og redusere muligheten for magnetoakustiske oscillasjoner. RF-spolene 113, 114 er så dekket med sliteplater 111, typisk keramikk eller et annet slitesterkt, ikke-ledende materiale for å beskytte dem fra borekaksen som strømmer oppover forbi verktøyet i boreslammet.

[0032] På grunn av den motsatte magnetkonfigurasjonen har anordningen til *Slade* er asymmetrisk magnetfelt og undersøkelsesområde 112 som er upåvirket av verktøyrotasjon. Bruk av ferritten resulterer i et undersøkelsesområde som er nær borehullet. Dette er ikke et hovedproblem på et MWD-verktøy fordi det er liten invasjon i formasjonen av borehullsfluider før loggingen. Undersøkelsesområdet er innenfor et

skall med en radial tykkelse på omkring 20 mm og en aksial lengde på omkring 50 mm. Gradienten innenfor undersøkelsesområdet er mindre enn 2,7 G/cm. Det skal bemerkes at disse verdiene er for anordningen til *Slade*, som bemerket ovenfor, og fremgangsmåten ifølge foreliggende oppfinnelse kan også brukes med andre egnede NMR-anordninger.

[0033] Magnetfeltene blir brukt til å utføre en typisk NMR-måling: et statisk magnetfelt B_0 og et vekslende magnetfelt B_1 med en komponent ortogonal til B_0 . Pulset NMR blir brukt hvor vekselfeltet B_1 blir strålt inn i prøven som en sekvens med skurer (vanligvis kalt pulser). En typisk pulssekvens er vist på fig. 3. B_1 -pulssekvensen omfatter eksitasjonspuls 200 fulgt av et antall refokuserende pulser (202a, 202b, 202c, 202d, 202e, ...). Spinnekkos skissert ved 205a, 205b, 205c, 205d, 205e, ... dannes mellom disse refokuseringspulser. Disse ekkoene manifesterer seg som roterende makroskopiske magnetiseringer og kan detekteres med en mottakerspole. De induerte spenningene/strømmene i denne spolen er de ønskede NMR-signalene. For å fremskaffe NMR-signaler og refokuserer dem korrekt, er det viktig å holde seg til NMR-resonanstillstander, dvs. B_0 - og B_1 -amplituder så vel som pulsfaser og former må velges korrekt som kjent for fagkyndige på NMR (se Fukushima, *Experimental Pulse NMR: A Nuts and Bolts Approach*, 1981, tiende utgave, januar 1998). Et eksempel på en optimalisert ekkosekvens kalt ORPS er f.eks. diskutert i *Hawkes '013*. I ORPS-sekvensen er tippespulsen typisk 90° , men refokuseringspulsen er mindre enn 180° . Dette er i motsetning til CPMG-sekvensen hvor refokuseringspulserne er pulser på 180° .

[0034] Geometrien til NMR-måleanordningen gir generelt opphav til et volum i grunnformasjonen hvor B_0 -feltet har den korrekte styrke til å oppfylle en resonansbetingelse og hvor et RF-felt kan være representert med en betydelig styrke og orientering for å reorientere kjernespinnet i volumet. Dette volumet blir ofte referert til som det følsomme volumet. For et verktøy i bevegelse, når verktøyet beveger seg aksialt, beveger volumet som inneholder disse protonene som er eksitert av eksiteringspulsen (den første pulsen av ekkosekvensen) seg bort fra det følsomme volumet. Antallet spinn som er tilgjengelige for å bidra til det etterfølgende NMR-signalet blir dermed redusert med hvert etterfølgende ekko. Som en følge av dette synes de ekko som er fremskaffet senere i ekkosekvensen med aksial verktøybevegelse å være små sammenlignet med de ekkoene som er fremskaffet senere i en ekkosekvens inn-

hentet uten verktøybevegelse. "Senere ekko" betyr ikke at bare de siste ekkoene i en sekvens blir påvirket. Tapet av signalstyrke starter i virkeligheten helt fra begynnelsen av en sekvens og utvikler seg over tid i et unikt mønster.

[0035] Magnetutformingene på fig. 2 frembringer et noe inhomogent statisk magnetfelt B_0 . Målt i aksial retning har dette feltet et minimum ved midten av NMR-sensoren og øker i størrelse til et maksimum ved magnetene. Resultatet av denne utformingene på et formasjonsvolum som krysses i aksial retning, er at under konstant aksial bevegelse kommer formasjonen først nær én av magnetene og blir magnetisert av dette høyere feltet. Når NMR-sensorens senter beveger seg nærmere, avtar det effektive B_0 -feltet. Men formasjonen "husker" den tidligere høyeste magnetiseringen og dempes bare gradvis med tidskonstanten T_1 mot det minste likevektsmagnetiseringsfeltet B_0 lokalisert i midten.

[0036] Generelt blir NMR-ekko-sekvenser gjentatt flere ganger for det formål å øke det endelige signal/støy-forholdet. Selv uten hensyn til signal/støy-forholdet blir en ekko-sekvens vanligvis gjentatt minst én gang for å danne et fasevekslet par (PAP) med det formål å fjerne forskyvnings- og ringingseffekter.

[0037] Ved slutten av en sekvens fremskaffet med aksial verktøybevegelse er magnetiseringen av det følsomme volumet hovedsakelig lik null. En ventetid under hvilken remagnetisering av formasjonen inntreffer, blir brukt som en del av sekvensen av pulser. Det å velge en ventetid på minst 5 ganger den lengste T_1 i formasjonen, sikrer at formasjonen blir fullstendig magnetisert (>99% magnetisering) umiddelbart før eksiteringspulsen i den etterfølgende sekvensen. Kortere ventetider blir imidlertid ofte valgt for å oppnå en høyere NMR-datahastighet, noe som fører til forbedret aksial oppløsning eller bedre signal/støy-forhold. Ulempen ved å forkorte TW er at formasjonen ikke kan magnetiseres fullstendig umiddelbart forut for den etterfølgende sekvensen. Følgelig kan den totale porøsiteten som blir målt i et verktøy med aksial bevegelse, bli for lav, og den målte T_2 -fordelingen er vanligvis forvrengt, hovedsakelig på grunn av de lengre T_2 -komponentene.

[0038] Fremgangsmåten ifølge foreliggende oppfinnelse korrigerer for artefakter som er et resultat av aksial bevegelse og forkortet ventetid (TW) mellom påfølgende pulssekvenser. Korreksjonen av spinnekkodempeningen (og dermed T_2 -fordelingen) for aksial bevegelse blir her referert til som korreksjon A, og korreksjonen for forhåndsmagnetisering og forkortet TW blir her referert til som korreksjon B.

[0039] Simuleringene på figurene 4-8 er fremskaffet ved å bruke en NMR-simulering for et verktøy slik som det som er vist på fig. 2. For disse simuleringene er varigheten av den påtrykte eksiteringspulsene 50 μ s, og varigheten av de påtrykte refokuseringspulsene er 70 μ s. En slik pulssekvens er blitt beskrevet i US-patent 6,466,013 utstedt til *Hawkes mfl.*, som har samme søker som foreliggende patent-søknad og hvis innhold herved inkorporeres ved referanse. I foreliggende dokument blir den referert til som optimalisert refasepulssekvens (ORPS). For simuleringen blir det brukt en pulsamplitude på 40A. Det følsomme volumet er hovedsakelig lokalisert innenfor radiale avstander $r = 130$ mm til $r = 230$ mm og innenfor aksiale avstander $z = -70$ mm til $z = 70$ mm. En todimensjonal simulering blir brukt.

[0040] Fig. 4 viser seks ekkotog fremskaffet ved forskjellige lokale hastigheter av en borestreng gjennom en formasjon. De seks ekkotogene blir fremskaffet ved forskjellige hastigheter: (402), (404), (406), (408), (410) med økende hastighet, (400) med null hastighet. Tid blir målt langs horisontalaksen og normalisert NMR-signalstørrelse langs den vertikale akselen. 1000 ekko blir brukt i pulssekvensen med $TE = 0,6$ ms. De kurvene som er fremskaffet ved de minste hastighetene som er forskjellig fra null (402, 404, 406 og 408) kan tydeligvis alle utledes fra den kurven som er fremskaffet for den høyeste hastigheten (410) ved ganske enkelt å komprimere horisontalaksen.

[0041] Resultatene av denne kompresjonen av horisontalaksen er vist på fig. 5. De to dempningskurvene som er fremskaffet med aksial bevegelse (402, 404, 406, 408 og 410 på fig. 4), faller nå nesten på toppen av hverandre som antyd det ved kurven 502. Kurven 500 indikerer et signal fremskaffet uten aksial verktøybevegelse. Denne innrettingen av "komprimerte" ekkodemperinger indikerer at ekkoamplitudene ikke er hastighetsavhengige, men bare posisjonsavhengige. Det er med andre ord ingen betydelig fasefeil som skyldes størrelsen av den aksiale bevegelsen. Denne oppdagelsen er i overensstemmelse med det faktum (ikke vist) at det ikke er noen særlig endring i den imaginære delen av NMR-signalet ved å sammenligne null hastighet med den høyeste hastigheten.

[0042] En første korreksjon referert til i det følgende som korreksjon A blir så diskutert. Denne korreksjonen er ment å ta hensyn til effektene av aksial verktøybevegelse. Kurvene på fig. 4 kan tilpasses en matematisk funksjon. På grunn av den karakteristiske formen og starten av ekkosekvensen virker et enkelt polynom ikke

særlig godt. Et perturberingsledd kan imidlertid innføres for å karakterisere svingningen ved små tidspunkter. Et eksempel på en funksjon som innbefatter et dempet kosinusledd som perturberingsledd, er anvendt for eksempel i ligning (3),

$$f_c A(t) = P_0 + P_1 \cdot t + P_2 \cdot t^2 + P_3 \cdot t^3 + P_4 \cdot t^4 + P_5 \cdot t^5 + P_6 \cdot t^6 + P_7 \cdot e^{-P_8 \cdot t} \cdot \cos(P_9 \cdot t). \quad (3)$$

Ligning (3) tilpasser ekkodempningskurven tilstrekkelig med den høyeste hastigheten (410 på fig. 4). P-parametere kan oppnås gjennom en tilpasningsmetode for rådataene. Det skal bemerkes at ligningen er sterkt avhengig av den geometriske formen til det følsomme område hvor målingen blir utført. Bruken av en dempet kosinus i ligning (3) er ikke ment som en begrensning av foreliggende oppfinnelse, og enhver funksjon som passer til denne matematiske beskrivelsen kan brukes. **[0043]** Hvis det antas en gruppe med NMR-ekkoamplituder $A(t)$ og aksial hastighet v_{axial} , kan man beregne den korrigerede amplituden $A_{cor}(t)$ ved å bruke den formelen som er vist i ligning (4) nedenfor:

$$A_{cor}(t) = \frac{A(t)}{f_c \left(t \cdot \frac{v_{axial}}{v_{ref}} \right)} \quad (4)$$

hvor f_c er den funksjon som er uttrykt i ligning (3) med det parametersettet som er gitt der. Denne korreksjonen kan brukes for enhver NMR-kanal, dvs. uavhengig reell og imaginær (eller i-fase og kvadratur).

[0044] Fig. 6 viser simuleringer fremskaffet ved å forutsette en uendelig T_2 -dempning. Råtraser fra simuleringene som er oppnådd ved forskjellige aksiale hastigheter, er vist. De forskjellige aksiale hastighetene vil hensiktsmessig bli benevnt som lav hastighet, middels hastighet, middels høy hastighet, på fig. 6, hvor disse er vist ved (601b, 602b, 606b) og henholdsvis 610b. De trasene som er et resultat etter anvendelse av korreksjon A for aksial hastighet, er merket (601a) (602a), (606a) og (610a). Den horisontale akse viser antallet ekko, mens den vertikale akse viser normalisert amplitude. For bedre å differensiere de individuelle kurvene er vertikale forskyvninger påført kurvene 601a/b, 602a/b og 606a/b. De korrigerede ekkotrasene

bør ideelt være flate linjer. Som fig. 6 viser, nærmer de korrigerte trasene seg hovedsakelig idealet.

[0045] Variasjoner i formene til RF-pulser påvirker de tilsvarende artefaktene. Den nøyaktige formen av bevegelsesartefaktet er avhengig av den anvendte type RF-pulssekvens. Fig. 7 viser simuleringer ved bruk av en annen RF-strøamplitude. Råtraser fra simuleringene ble utført ved forskjellige aksiale hastigheter fra de ovennevnte. Lav hastighet (702b), middels hastighet (704b), middels (706b), middels høy (708b) og høy hastighet (710b) er vist. De trasene som fremkommer etter påføring av korreksjon A for aksial hastighet, er merket (702a), (704a), (706a), (708a) og (710a). Den horisontale aksen viser antallet ekko, mens den vertikale aksen viser normalisert amplitude. For bedre å differensiere de individuelle kurvene, er vertikale forskyvninger påført kurvene. Det er 1000 ekko vist med innbyrdes ekkoavstand $TE = 0,6$ ms. Ved å sammenligne figur 7 med resultater som vist på fig. 6 for den høyeste RF-pulsamplituden (på hvilken korreksjonsfunksjonen er basert), viser det seg at korreksjon A er robust under variasjoner av RF-pulsen.

[0046] Alternativt fører variasjon av forholdet mellom RF-pulsområder mellom eksiteringspulsene og refokuseringspulsene til forskjellige artefakter. For en sekvens med selektiv eksiteringspuls kan f.eks. signalreduksjonen ved begynnelsen av sekvensen unngås. En korreksjonsfunksjon kan velges for å muliggjøre korreksjon av en trase som er et resultat av den selektive eksiteringspulssekvensen. Alternativt kan en annen tilpasningsfunksjon velges for andre RF-pulssekvenser eller forskjellige ekko-integreringer, slik som beskrevet i US-patentsøknad nr. 10/839,478 fra *Blanz* mfl.

[0047] Fig. 8 viser at korreksjonsfunksjonen i ligning (1), som er fremskaffet ved å bruke en simulering med uendelig T_2 , kan brukes for reelle NMR-signaler som har endelig T_2 . Ett tusen ekko er vist langs den horisontale aksen med en innbyrdes ekkoavstand lik $TE = 0,6$ ms. Den vertikale aksen viser NMR-amplituder, men med vertikale forskyvninger for å differensiere kurvene i diagrammet. Korreksjoner er gjort på kurvene 840 og 885. Simuleringer er utført ved å bruke en endelig T_2 ($T_2=1$ s). Forskjellige hastigheter for (840) og (885). Disse ekkodempingene er vist for hver hastighet: den ukorrigerede dempingen, den korrigerede dempingen og dempingen ved null hastighet. På fig. 8, er f.eks. ukorrigeret demping 840 korrigeret for å oppnå en korrigeret demping 805 som blir sammenlignet med demping ved null hastighet

800. Ukorrigert dempning 885 er likeledes korrigeret for å oppnå korrigeret dempning 880 som blir sammenlignet med dempning 860 ved null hastighet.

[0048] En annen korreksjon, referert til som korreksjon B, som kan anvendes i fore-

5 redusert ventetid TW, blir diskutert. Fig. 9 viser 2 ORPS-sekvenser bare atskilt med en ventetid TW. Begge ORPS har 1000 ekko hver, $TE = 0,6$ s. Ventetiden TW er 1 s.

[0049] Når ventetiden mellom ORPS-sekvenser er kortere enn fem ganger den lengste T_1 i grunnformasjonen, begynner sistnevnte sekvens før riktig magnetisering er blitt oppnådd. Amplituden til det resulterende NMR-signalet er derfor avhengig av

10 graden av restmagnetisering etter den foregående sekvensen og av varigheten av ventetiden. Magnetiseringen etter en ORPS-sekvens påført med aksial verktøy-bevegelse er hovedsakelig lik null. Hvis det ikke er noen bevegelse under den første ORPS-sekvensen, er imidlertid en betydelig mengde med z-magnetisering tilbake.

Fig. 10 viser simuleringseksempler for ekkodempingner frembrakt ved å bruke den

15 andre ORPS-sekvensen fra fig. 9. For simuleringen på fig. 10 er $T_1 = T_2 = 2,5$ s. Simuleringer blir gjort ved null hastighet (1000), lav aksial hastighet (1021), økende aksiale hastigheter (1040), (1062), (1081), (1102) og den høyeste hastigheten (1120). For store formagnetiseringseffekter på grunn av bevegelig formasjons-

20 materiale, som er blitt eksponert for et høyere magnetfelt i tett nærhet til magnetene, kan ses. I dette tilfelle øker de innledende størrelsene (ved $t = 0$) av dempnings-trasene på fig. 10 med økende hastighet, med ett unntak. Ett unntak kan finnes i trasen for null hastighet, som har en innledende amplitude høyere enn de innledende amplitudene som er fremskaffet ved høyere hastigheter. Dette unntaket er høyt på grunn av z-magnetiseringen som er tilbake etter slutten av den første ORPS-

25 sekvensen, som skyldes den periodiske beskaffenheten til ORPS. Aksial hastighet forstyrrer denne koherenseffekten.

[0050] For å motvirke den uregelmessige, innledende amplituden som finnes ved null hastighet, kan en forkortet metningssekvens påføres. Et eksempel på en forkortet metningssekvens er en aperiodisk pulssekvens (APS) slik som vist på fig. 11.

30 **[0051]** I et utførelseseksempel av foreliggende oppfinnelse blir det konstruert en APS med åtte eksiteringspulser (f.eks. med lengde på $50 \mu\text{s}$) med avtagende pulsmellomrom på $6400 \mu\text{s}$, $3200 \mu\text{s}$, $1600 \mu\text{s}$, $800 \mu\text{s}$, $400 \mu\text{s}$, $200 \mu\text{s}$, $100 \mu\text{s}$. De til-

svarende fasene er 0° , 180° , 90° , 270° , 0° , 180° , 90° og 270° . Den totale varigheten av denne sekvensen er $12,7 \text{ ms} + 8 \cdot 50 \text{ } \mu\text{s} = 13,1 \text{ ms}$.

5 **[0052]** For pålitelig formagnetiseringskorreksjon (B) blir en kort periodisk metningssekvens som beskrevet her, foretrukket, ikke bare for simuleringen, men også i den virkelige NMR-loggekjøringen. Ettersom en APS med åtte pulser er bare 13 ms lang, er det ingen ulempe å gjøre dette. Dette er vist på fig. 11 ved den innledende ORPS (eller CPMG-sekvensen) 1121, APS-sekvensen 1123, ventetiden 1125 og en gjentakelse av ORPS 1127.

10 **[0053]** Fig. 12 viser resultater av simuleringer for å oppnå korreksjoner for for sterk forpolarisering og lang T_1 (med utilstrekkelig ventetid). Disse simuleringene anvender en APS og har følgende egenskaper: den første ORPS har 1000 pulser med $TE = 0,6 \text{ ms}$; $TW = 6 \text{ s}$ og den annen ORPS har bare to refokuseringspulser og frembringer to ekko hvor det andre ekkoet blir brukt til bestemmelse av ekkoamplituden. Figurene 12 viser derfor en diskontinuitet mot null hastighet.

15 **[0054]** Størrelsen av ekkoamplituden som er fremskaffet ved å bruke pulsssekvensen på fig. 11, er avhengig av de to variable, aksial hastighet (v), og T_1 . Analyse ved å bruke diskrete verdier av T_1 kan utføres. I et eksempel på en fullstendig analyse er 6 diskrete hastigheter og 6 diskrete verdier av T_1 valgt, og en simulering blir kjørt for hver kombinasjon av disse. Dette gir opphav til en matrise med normaliserte ekkoamplituder S_n slik som vist i matrisen i ligning (5).

20

$$S_n = \begin{bmatrix} 1 & S_{12} & K & S_{1M} \\ 1 & S_{22} & K & S_{2M} \\ M & M & O & M \\ 1 & S_{N2} & K & S_{NM} \end{bmatrix}$$

25 Fra venstre til høyre i matrisen S_n , øker T_1 fra null til en maksimumsverdi. Fra topp til bunn øker den aksiale hastigheten fra 0 til en maksimumsverdi. En grafisk tredimensjonal representasjon av matrisen S_n er vist på fig. 12.

[0055] Den simulerte ekkoamplituden til matrisen S_n kan tilpasses en analytisk funksjon. I én utførelsesform av oppfinnelsen er tilpasningsfunksjonen et polynom av formen:

$$p(v, t) := \sum_{i=0}^{\text{last}(\text{coeffs})} \text{coeffs}_i \cdot v^{l_{i,0}} \cdot t^{l_{i,1}} \quad (6)$$

hvor v er den aksial hastigheten og t er spinn/gitter-relaksasjonstiden T_1 med eksponenter tatt fra tabell 1 nedenfor.

5

Tabell 1

| l | $l_{i,0}$ | $l_{i,1}$ |
|-----|-----------|-----------|
| 0 | 1 | 2 |
| 1 | 0 | 3 |
| 2 | 0 | 2 |
| 3 | 0 | 1 |
| 4 | 1 | 1 |
| 5 | 2 | 1 |
| 6 | 0 | 0 |
| 7 | 1 | 0 |
| 8 | 2 | 0 |
| 9 | 3 | 0 |

Fordi tilpasningsfunksjonen nødvendigvis er avhengig av to variable, kan en multi-variabel regresjon brukes. Ligningene (7) nedenfor viser en tilpasningsmatrise S_{fit} og formen til feilmatrixen (ved bruk av et polynom av tredje orden).

10

$$S_{\text{fit}} = \begin{bmatrix} S_{f11} & S_{f12} & K & S_{f1M} \\ S_{f21} & S_{f22} & K & S_{f2M} \\ M & M & O & M \\ S_{fN1} & S_{fN2} & K & S_{fNM} \end{bmatrix}$$

$$100 \cdot (S_{\text{fi}} - S_{\text{n}}) = \begin{bmatrix} S_{e11} & S_{e12} & K & S_{e1M} \\ S_{e12} & S_{e22} & K & S_{e2M} \\ M & M & O & M \\ S_{eN1} & S_{eN2} & K & S_{eNM} \end{bmatrix}$$

15

[0056] Fig. 13 viser prosentfeilen mellom de tilpassede og de simulerte dataene $(S_{\text{fit}} - S_n) \cdot 100$. En forbedret tilpasning kan oppnås ved å bruke et høyere ordens polynom i stedet for uhensiktsmessigheten ved å øke antallet koeffisienter.

[0057] Sammen med aksial hastighet (v) og T_1 kan en tredje parameter, TW , også varieres, og et polynom med tre variable $p(v, T_1, TW)$, kan tilpasses den resulterende kurven. Den to-dimensjonale matrisen i ligning 5 og fig. 12 blir så en tre-dimensjonal matrise med den tredje dimensjonen i form av den variable TW . Potensen til eksponentene (tabell 3) vil da ha tre kolonner i stedet for to. For den samme ordens polynom (her tredje orden), vil det være flere koeffisienter. For en tredje dimensjon er det 20 koeffisienter, mens det for to dimensjoner bare er 10 koeffisienter. I stedet for å plote én graf, ekvivalent med fig. 12-13, kan flere grafer plottes for individuelle TW -verdier.

[0058] For å påføre korreksjon B (for å korrigere for artefakter som skyldes formagnetisering og forkortet ventetid (TW), kan man inndele ekkodempningsamplitudene (fortrinnsvis etter å ha anvendt korreksjon A) ved hjelp av den skalaren som er et resultat fra evaluering av det polynomet som er skissert i ligning (6). Den aksiale hastigheten (v) og T_1 for NMR-prøven blir registrert forut for denne korreksjonen.

[0059] Korreksjon B kan brukes med en hvilken som helst ekkodempningssekvens. Suksessen til denne fremgangsmåten ved å bruke korreksjon B, skyldes det faktum at korreksjon B bare korrigerer magnetiseringen ved begynnelsen av ekkosekvensen. Denne innledende magnetiseringen avhenger av (den magnetiske) geometrien til NMR-loggeverktøyet, den aksiale hastigheten (v) under ventetiden TW , og T_1 .

[0060] Korreksjon B er en tilnærming for lave aksiale hastigheter. Ved høye aksiale hastigheter blir z -magnetiseringen påvirket av relakserende formagnetisering også innenfor ORPS-sekvensen. Innbefatning av virkningene av høy aksial hastighet i formagnetiseringen, innebærer å øke dimensjonen til polynomet med 1, dvs. bruken av et polynom med tre eller fire variable.

[0061] Fig. 14 viser et flytskjema over foreliggende oppfinnelse i nærvær av en T_1 -fordeling. I en virkelig grunnformasjon bør en T_1 -fordeling (i stedet for en enkelt T_1 -verdi) ventes. Også en T_2 -fordeling er ventet. Etter T_2 -invertering av ekkoomhyllingsdataene (etter å ha påført korreksjon A), representerer hver T_2 -gruppe en enkelt eksponensiell dempningsfunksjon med en karakteristikk T_2 og den vekt som er gitt av høyden i gruppen. Overlagringen av alle disse eksponensielle funksjonene utgjør en

multiekspensiell tilpasning til signaldempningsdataene. På grunn av den lineære addisjon av individuelle eksponensielle dempninger, kan korreksjon B anvendes på hver eksponensiell funksjon separat, dvs. anvendelse av korreksjon B på hver gruppe i T_2 -fordelingen, hvor alle grupper har en felles aksial hastighet, men individuell T_1 . For tilfellet med $T_1 = f(T_2)$ hvor funksjonen $f(T_2)$ er kjent, kan den nødvendige T_1 fremskaffes direkte fra fordelingen av T_2 . Forholdet mellom T_1 og T_2 kan f.eks. ganske enkelt være en faktor $T_1 = \text{fac} \cdot T_2$ hvor "fac" normalt vil være i området fra 1 til 2. Ved å gjøre bruk av dette forholdet, blir det mulig å tildele en spesifikk T_1 -verdi til hver gruppe i T_2 -fordelingen. Korreksjon B kan derfor påføres i form av en høydekorreksjonsfaktor individuelt for hver gruppe for til slutt å ankomme ved den virkelige T_2 -fordelingen hvor "virkelig" eller "sand" betyr at alle artefakter som skyldes (konstant) aksial hastighet og utilstrekkelig ventetid, er korrigert.

[0062] I boks 1501 på fig. 14 blir rådataene fremskaffet, typisk ved å bruke en fasevekslet parsekvens. Korreksjon A (korreksjon for aksial hastighet) blir påført i boks 1503. Enhver ønsket fasekorreksjon som er nødvendig, kan påføres i boks 1505. Ved T_2 kan invertering oppnås ved å ha liten n grupper (boks 1507). Etersom T_1 er funksjonelt avhengig av T_2 , blir den T_1 som svarer til hver T_2 følgelig beregnet i boks 1509. Korreksjon B (korreksjon avhengig av aksial hastighet og T_1) blir påført hver T_2 -gruppe i boks 1511. Korreksjonen B blir påført denne eksponensielle dempningsfunksjonen. Fra påføringen av korreksjon B blir det oppnådd en korrigert T_2 for hver gruppe, og dermed for hele T_2 -fordelingen (boks 1513). Resultatene av beregningene fører til forbedrede resultater for virkelig eller sann total porøsitet (boks 1515).

[0063] Fig. 15 viser en simulering av NMR-data ved å bruke APS-sekvensen på fig. 11. En simulering blir utført for en lav boringshastighet og $T_1 = 2,2$ ms for å teste korreksjonene A og B for et brukereksempel. Trase 1600 er den ekkodemplingsreferansetrasen som er oppnådd med fullstendig likevektsmagnetisering og null hastighet. Trase 1620 er en ukorrigert ekkodemplingsstrase. Trase 1610 er den trasen som er et resultat etter korreksjon A er anvendt på trase 1620, og trase 1605 er den trasen som er et resultat etter at kolleksjon A og B er anvendt. Disse dataene er ikke normalisert. Den normaliserte trasen 1605 er omkring 1% lavere enn referansetrasen 1600. Prosentfeilen som nettopp er angitt for figur 15, er en relativ feil. Ved en total porøsitet på (f.eks.) virkelig 20%, vil en relativ feil på -1% føre til et

resultat som er 1% (relativt) for lite, dvs. at denne porøsiteten ville bli plottet som $20\% * 0,99 = 19,8\%$.

5 **[0064]** Pulssekvenser eller ekkobehandlingsmetoder som er a priori mindre følsomme for bevegelse enn standard pulssekvenser kan brukes i forbindelse med foreliggende oppfinnelsen. Noen slik metoder er blitt beskrevet i US-patentsøknad nr. 10/839,478 fra *Blanz* mfl. Slik pulssekvenser er enkle å bruke (på bekostning av visst tap av signal/støy-forhold). Fremgangsmåter for å redusere følsomheten for ujevn bevegelse ved små amplituder (vibrasjon) kan kombineres med korreksjonene A og B for ROP-korreksjon som beskrevet i denne rapporten. Korreksjon A vil være 10 avhengig av denne andre bevegelsesartefakt-reduksjonsmetoden og må skreddersys tilsvarende.

15 **[0065]** Oppfinnelsen er blitt beskrevet under henvisning til en NMR-anordning som er en del av en BHA boret på en borestreng. Oppfinnelsen er like anvendelig for NMR-anordninger transportert på oppkveilingsrør, kabler og glattkabler. Den behandlingen som er beskrevet her, kan gjøres ved å bruke en brønnhullsprosessor og resultatene lagret i et passende lager i brønnhullet eller overført til overflaten. Alternativt kan dataene lagres i et brønnhullslager og behandles når bunnhullsanordningen blir kjørt ut av borehullet. Med forbedret telemetrikapasitet skulle det være mulig å overføre NMR-målingene til et sted på overflaten og foreta behandlingen der.

20 **[0066]** Selv om den foregående beskrivelsen er rettet mot de spesielle utførelsesformene for oppfinnelsen, vil forskjellige modifikasjoner være opplagte for fagkyndige på området. Det er ment at alle slike variasjoner innenfor rammen av de vedføyde patentkrav skal være omfattet av den foregående beskrivelsen.

P A T E N T K R A V

1. Fremgangsmåte for behandling av kjernemagnetiske resonans-signaler (NMR-signaler) fra en grunnformasjon, omfattende følgende trinn:

- 5 (a) å transportere et NMR-loggeverktøy inn i et borehull (26) i grunnformasjonen og forflytte det aksialt med en aksial hastighet y ;
- (b) å polarisere kjernespin i grunnformasjonen;
- (c) å pulse en antenne på NMR-loggeverktøyet med minst én pulssekvens og frembringe spinnekkosignaler, hvor den minst ene pulssekvensen
- 10 innbefatter en eksiteringspuls og et antall refokuseringspulser; og
- (d) å korrigere spinnekkosignalene ved å bruke en funksjon for den aksiale hastigheten og frembringe første korrigerede spinnekkosignaler,

k a r a k t e r i s e r t v e d at funksjonen er av formen:

15
$$A_{\text{cor}}(t) = \frac{A(t)}{f_c \left(t \cdot \frac{v_{\text{axial}}}{v_{\text{ref}}} \right)}$$

hvor $A(t)$ er valgt fra: (i) en fasekomponent for spinnekkosignaler, (ii) en kvadraturkomponent for spinnekkosignalene og (iii) en amplitude for spinnekkosignalene, t er tid, $A_{\text{corr}}(t)$ er et korrigert signal, v_{axial} er den aksiale hastigheten, v_{ref} er referanse-

20 hastigheten, og f_c er en normalisert funksjon.

2. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor loggeverktøyet blir transportert inn i borehullet (26) ved én av: (i) en kabel, og, (ii) en glattkabel, (iii) en borestreng (20), og, (iv) et oppkveilingsrør.

25 3. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor polarisering av spinnene videre omfatter trinnet med å frembringe et statisk magnetfelt (B_0) i grunnformasjonen ved å bruke en magnet (103, 104) på loggeverktøyet.

30 4. Fremgangsmåte ifølge krav 3, hvor bærefrekvensen til den minst ene pulssekvensen er relatert til en feltstyrke for det statiske magnetfeltet (B_0).

5. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor korrigeringen videre omfatter skalering av spinnekkosignalene ved hjelp av normaliseringsfunksjonen.
- 5 6. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor funksjonen f_c omfatter en polynomfunksjon og et perturberingsledd.
7. Fremgangsmåte ifølge krav 6, hvor perturberingsleddet kan omfatte et dempet oscillasjonsledd.
- 10 8. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor eksiteringspulsens har en tippvinkel som hovedsakelig er lik 90° .
9. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor den minst ene pulssekvensen omfatter et antall pulssekvenser med en ventetid (TW) mellom en slutt-tid for en pulssekvens og en starttid for en etterfølgende pulssekvens.
- 15 10. Fremgangsmåte ifølge krav 9, videre omfattende trinnet med å bruke en metningssekvens etter en slutt-tid for en pulssekvens i antallet pulssekvenser.
- 20 11. Fremgangsmåte ifølge ethvert av krav 1, 9 og 10, hvor korrigeringen videre omfatter trinnet med å skalere spinnekkosignalene ved hjelp av en normaliseringsfunksjon relatert til den aksiale hastigheten, en longitudinal relaksasjonstid for grunnformasjonen, en referansehastighet og en ventetid.
- 25 12. Fremgangsmåte ifølge krav 11, hvor normaliseringsfunksjonen omfatter en polynomfunksjon for den longitudinale relaksasjonstiden og den aksiale hastigheten.
13. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor loggeverktøyet blir transportert i borehullet (26) på en bunnhulls-anordning (BHA), idet fremgangsmåten videre omfatter trinnet med å bestemme hastigheten ved å bruke målinger fra et akselerometer på nevnte BHA.
- 30

14. Fremgangsmåte ifølge krav 1, hvor kjernespinnene er karakterisert ved en transversal relaksasjonstidsfordeling (T_2 -fordeling) og en longitudinal relaksasjonstidsfordeling (T_1 -fordeling), hvor fremgangsmåten videre omfatter trinnet med å estimere en porøsitet for grunnformasjonen, hvor estimatet av porøsitet i det minste delvis er basert på den aksiale hastigheten, et estimat av T_2 -fordelingen og et estimat av T_1 -fordelingen.
15. Fremgangsmåte ifølge krav 14, hvor estimeringen av porøsiteten videre omfatter trinnet med å anvende en fasekorreksjon på de første korrigerede spinnekkosignalene for å gi andre korrigerede spinnekkosignaler.
16. Fremgangsmåte ifølge krav 15, hvor estimeringen av porøsiteten videre omfatter trinnet med å invertere de andre korrigerede spinnekkosignalene for å gi en fordeling av de transversale relaksasjonstidene T_2 , hvor fordelingen er definert over et antall grupper.
17. Fremgangsmåte ifølge krav 16, hvor estimeringen av porøsiteten videre omfatter trinnet med å bestemme fra nevnte T_2 -fordeling, en fordeling av T_1 .
18. Anordning for kjernemagnetisk resonans-logging (NMR-logging) av en grunnformasjon, hvor anordningen omfatter:
- (a) et NMR-loggeverktøy som er egnet til å bli transportert inn i et borehull (26) i grunnformasjonen ved hjelp av en transportanordning og forflyttet aksialt i borehullet (26) med en aksial hastighet;
 - (b) en magnet på NMR-loggeverktøyet som er egnet til å polarisere kjernespinnet i grunnformasjonen;
 - (c) en antenne på loggeverktøyet som er egnet til å bli pulset med minst én pulssekvens og til å frembringe spinnekkosignaler fra kjernespinnene, hvor minst én pulssekvens innbefatter en eksiteringspuls og et antall refokuseringspulser;
 - (d) en mottaker som er egnet til å motta spinnekkosignalene; og

- (e) en prosessor som er egnet til å korrigere spinnekkosignalene ved å bruke en funksjon for den aksiale hastigheten og til å frembringe første korrigerede spinnekkosignaler,

5 k a r a k t e r i s e r t v e d at prosessoren er egnet til å bruke en funksjon av formen:

$$A_{\text{cor}}(t) = \frac{A(t)}{f_c \left(t \cdot \frac{v_{\text{axial}}}{v_{\text{ref}}} \right)}$$

10 hvor $A(t)$ er valgt fra: (i) en fasekomponent for spinnekkosignalene, (ii) en kvadraturkomponent for spinnekkosignalene og (iii) en amplitude for spinnekkosignalene, t er tid, $A_{\text{corr}}(t)$ er et korrigert signal, v_{axial} er den aksiale hastigheten, v_{ref} er en referansehastighet, og f_c er en normaliseringsfunksjon, og hvor et akselerometer er anordnet på transportanordningen, og hvor prosessoren er egnet til å benytte målinger tatt av akselerometeret til å bestemme den aksiale hastigheten.

15

19. Anordning ifølge krav 18, hvor transportanordningen omfatter én av: (i) en kabel, (ii) en glattkabel, (iii) en borestreng (20) og (iv) et oppkveilingrør.

20 20. Anordning ifølge krav 18, hvor en bærefrekvens for pulsssekvensen er relatert til en feltstyrke for et statisk magnetfelt (B_0) frembrakt av magneten.

21. Anordning ifølge krav 18, hvor prosessoren er egnet til å korrigere spinnekkosignalene ved bruk av normaliseringsfunksjonen.

25

22. Anordning ifølge krav 18, hvor eksiteringspulsens har en tippevinkel som er hovedsakelig lik 90° .

23. Anordning ifølge krav 18, hvor den minst ene pulsssekvensen omfatter et antall pulsssekvenser med en ventetid (TW) mellom en slutt-tid for én av antallet pulsssekvenser og en starttid for en etterfølgende pulsssekvens.

30

24. Anordning ifølge krav 23, hvor antennen videre er egnet til å pulse grunnformasjonen med en metningssekvens etter slutt-tiden for en pulsssekvens i antallet pulsssekvenser.

5

25. Anordning ifølge krav 24, hvor prosessoren videre er egnet til å skalere spinn-ekkosignalene ved hjelp av en normaliseringsfunksjon relatert til den aksiale hastigheten, en longitudinal relaksasjonstid for grunnformasjonen og en referanse-hastighet.

10

26. Anordning ifølge krav 18, hvor transportanordningen er en bunnhullsanordning (BHA).

27. Anordning ifølge krav 18, hvor kjernespinne er kjennetegnet ved en transversal relaksasjonstidsfordeling (T_2 -fordeling) og en longitudinal relaksasjonstidsfordeling (T_1 -fordeling), og hvor prosessoren videre er egnet til å beregne en porøsitet for grunnformasjonen, i det minste delvis basert på hastigheten, et estimat av T_2 -fordelingen og et estimat av T_1 -fordelingen.

15

28. Anordning ifølge krav 27, hvor prosessoren videre er egnet til å estimere porøsiteten ved anvendelse av en fasekorleksjon på de første korrigerede spinnekkosignalene for å gi andre, korrigerede spinnekkosignaler.

20

29. Anordning ifølge krav 28, hvor prosessoren videre er egnet til å estimere porøsiteten ved å invertere de andre korrigerede spinnekkosignalene for å gi en fordeling av de transversale relaksasjonstidene T_2 , de fordelingene som er definert over et antall grupper.

25

1/9

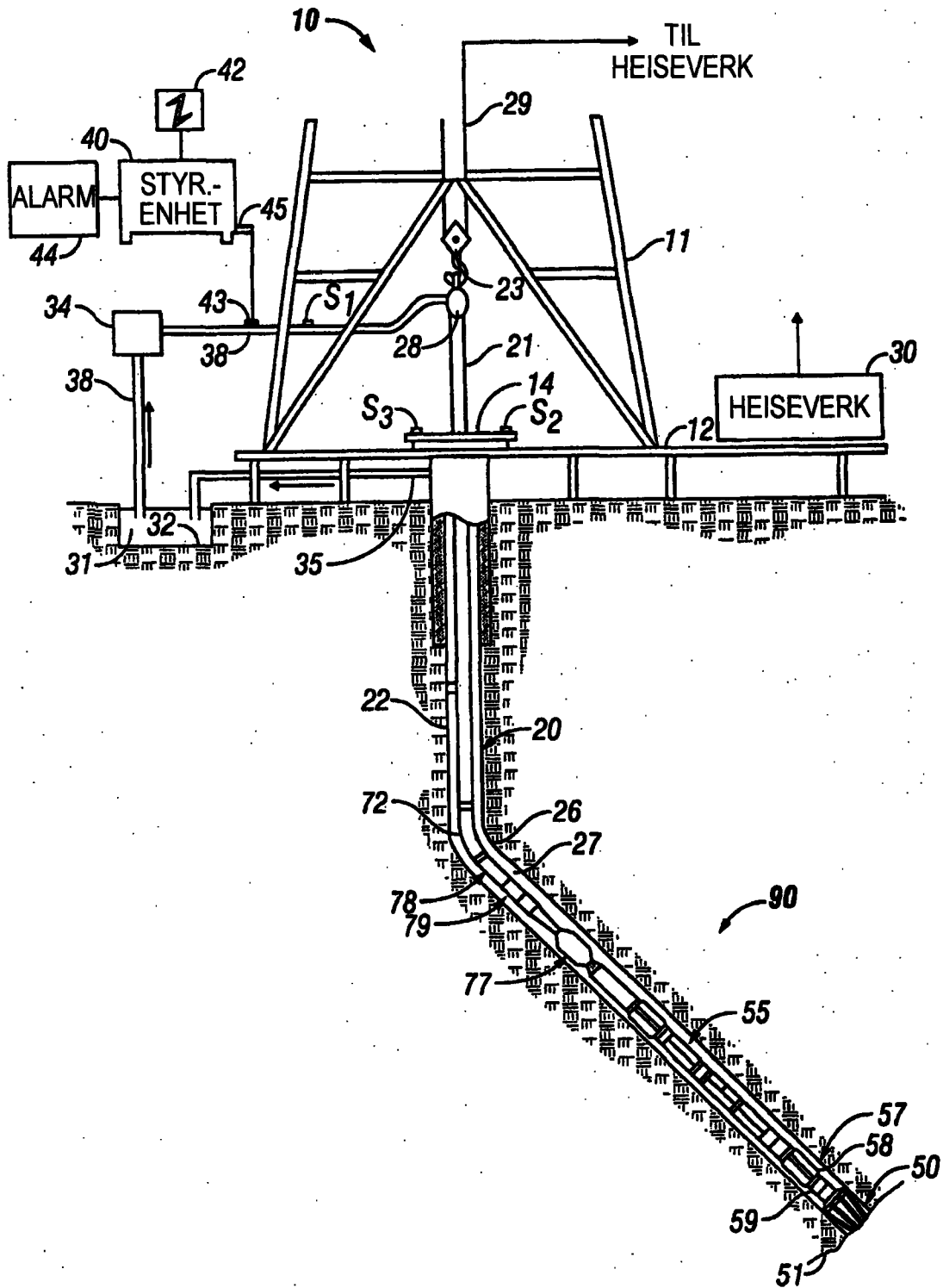


FIG. 1
(Kjent teknikk)

3/9

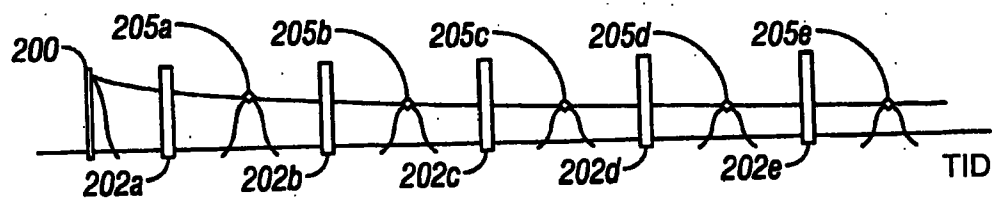


FIG. 3

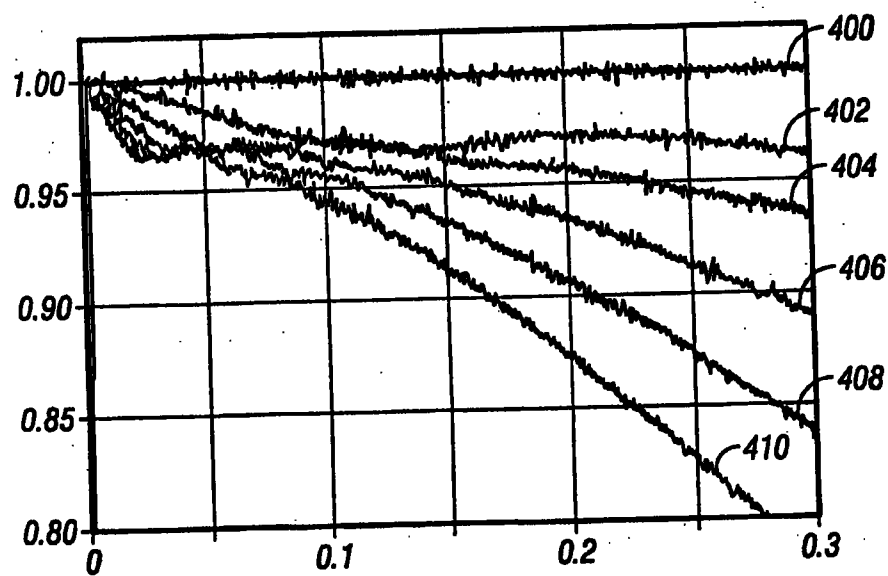


FIG. 4

4/9

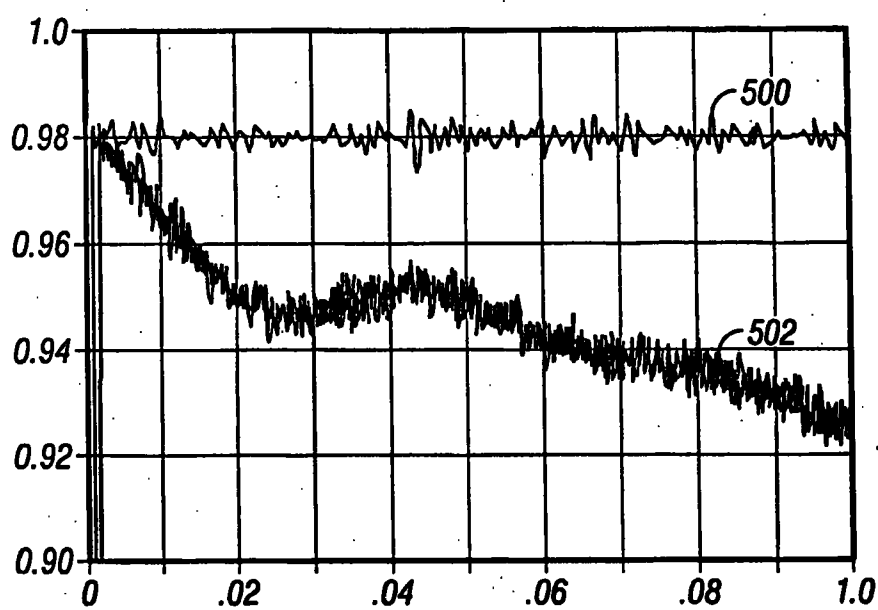


FIG. 5

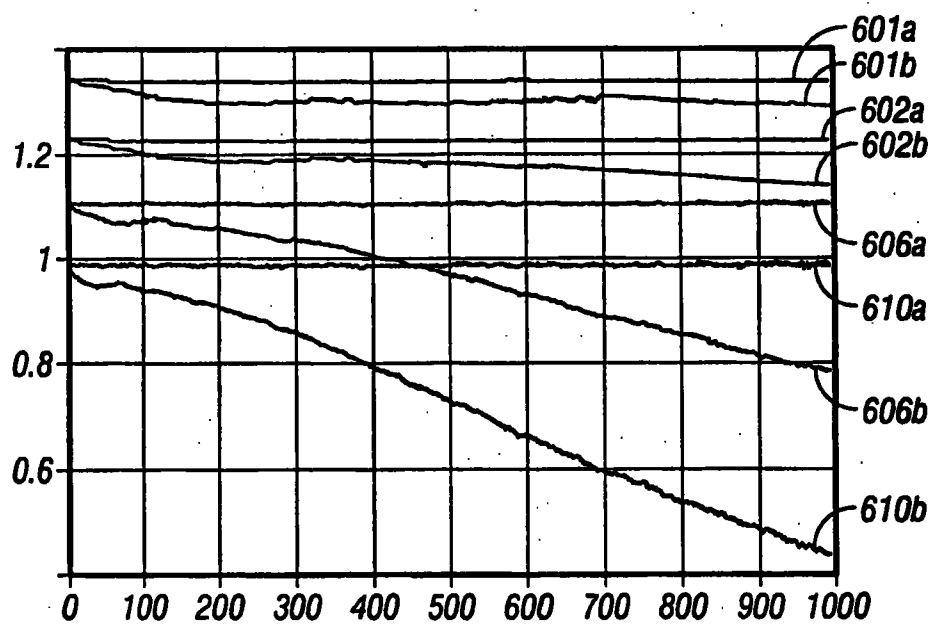


FIG. 6

5/9

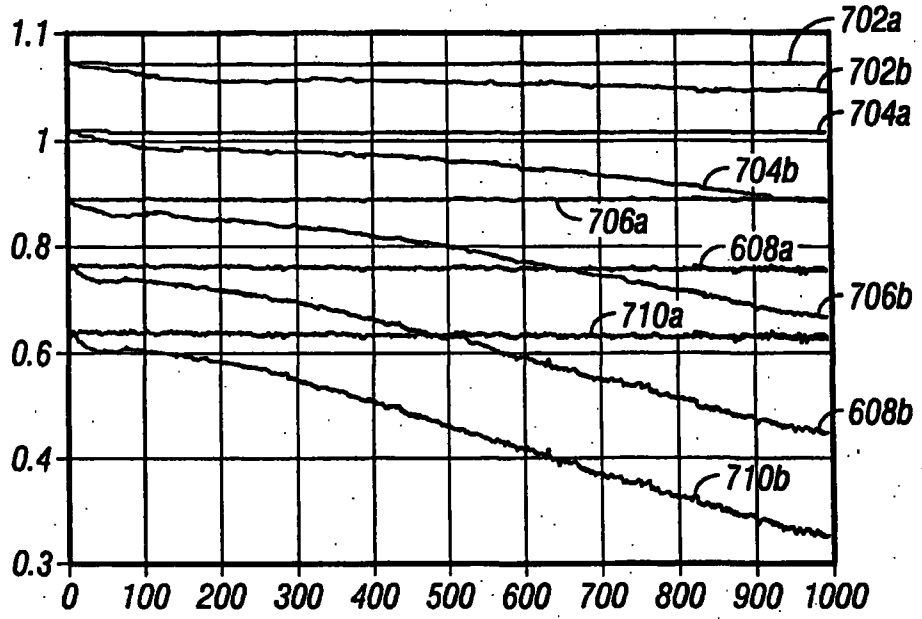


FIG. 7

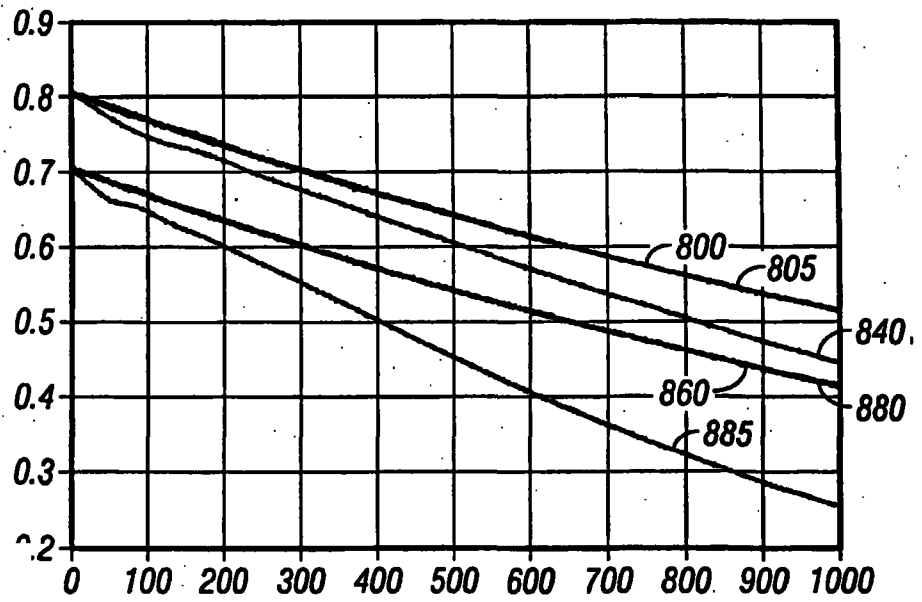


FIG. 8

6/9



FIG. 9

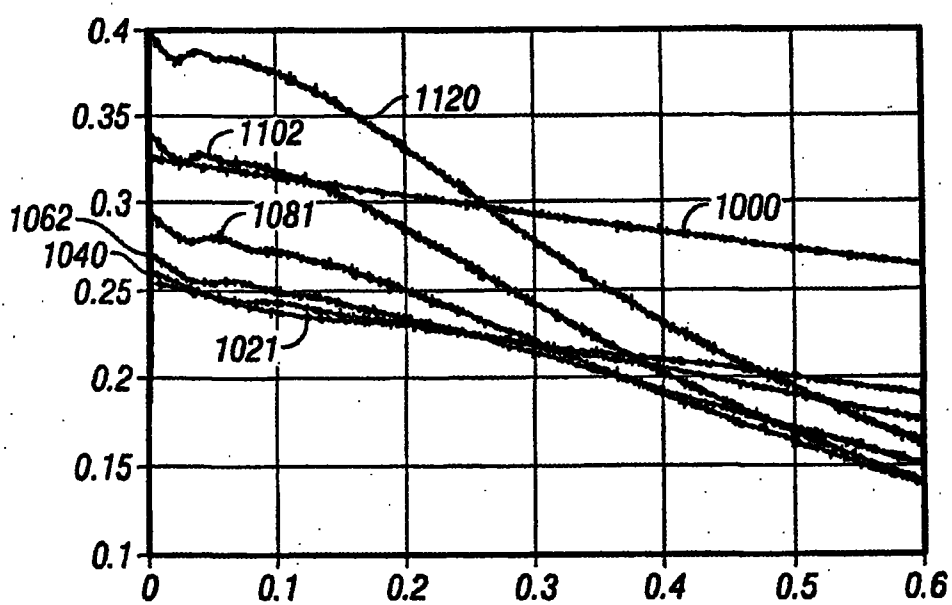


FIG. 10

7/9

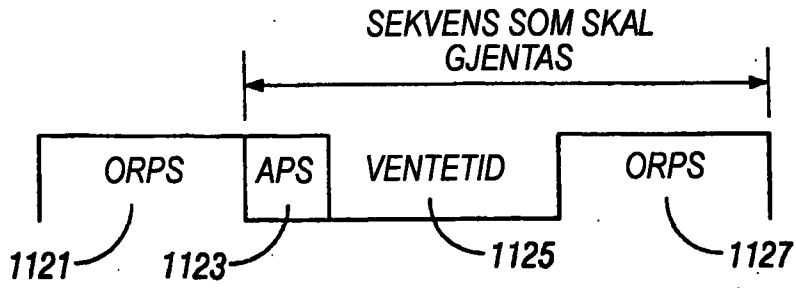


FIG. 11

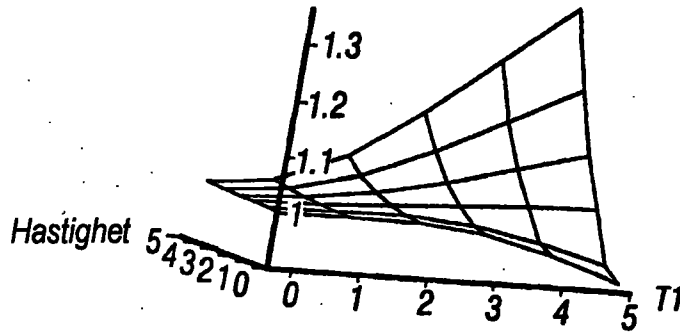


FIG. 12

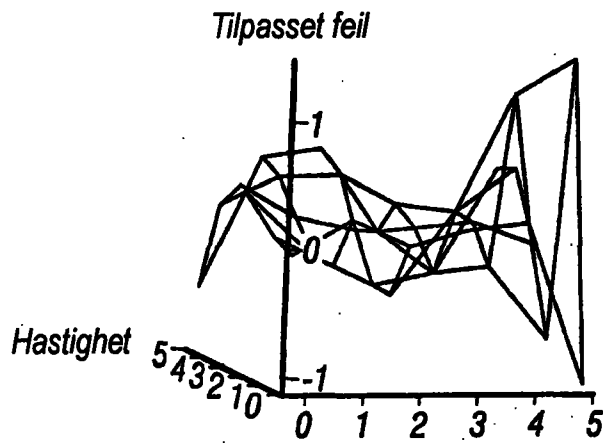


FIG. 13

8/9

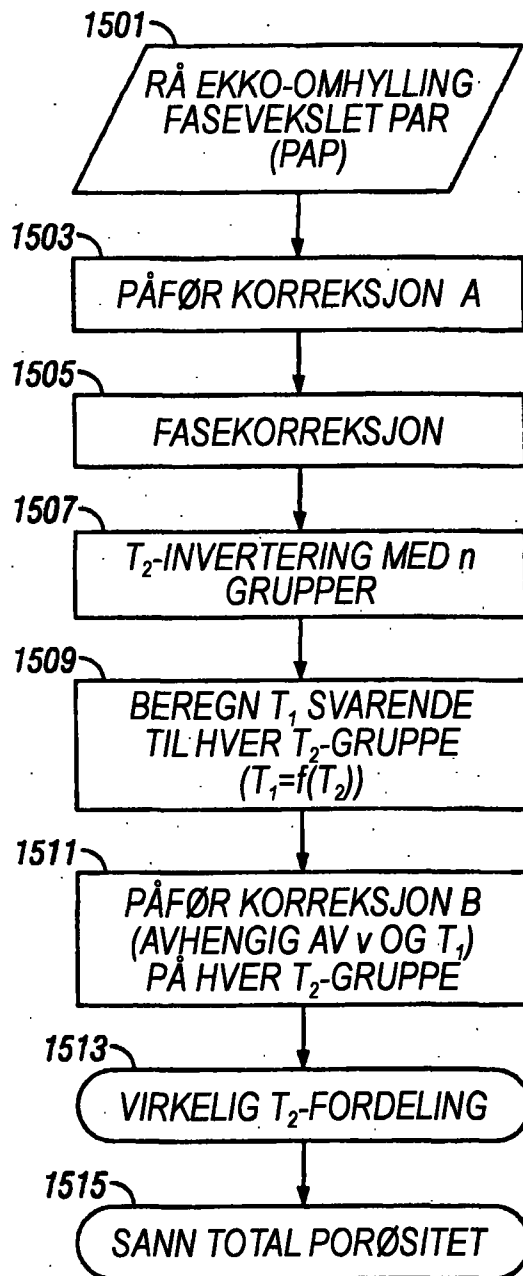


FIG. 14

9/9

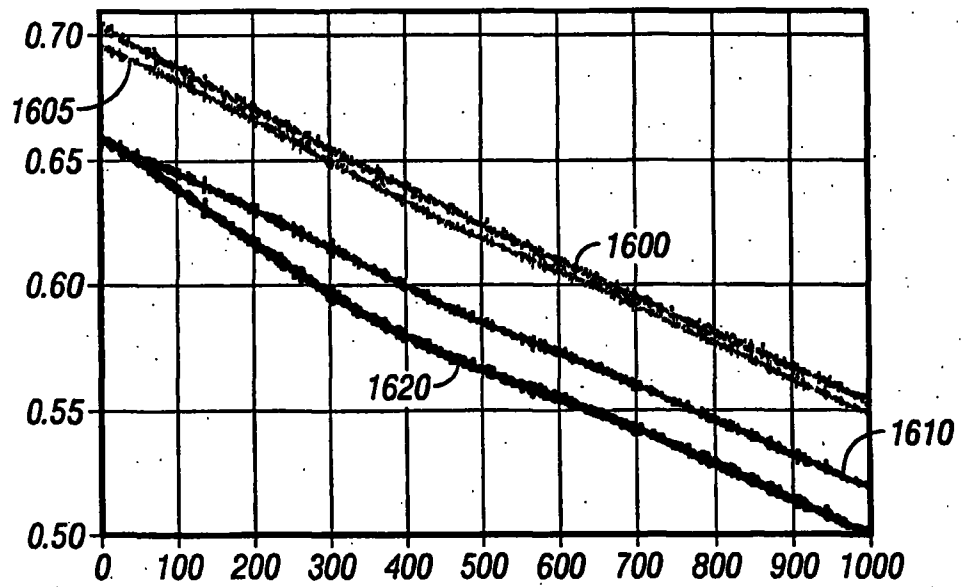
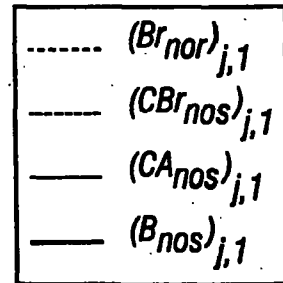


FIG. 15