



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) BR 112014032950-8 B1**



**(22) Data do Depósito: 02/07/2013**

**(45) Data de Concessão: 20/04/2021**

**(54) Título:** PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE CLÍNQUER DE CIMENTO A PARTIR DE FARINHA CRUA DE CIMENTO

**(51) Int.Cl.:** C04B 7/43.

**(30) Prioridade Unionista:** 04/07/2012 DE 10 2012 105 977.2.

**(73) Titular(es):** THYSSENKRUPP INDUSTRIAL SOLUTIONS AG.

**(72) Inventor(es):** SEBASTIAN FRIE; SEBASTIAN OBERHAUSER.

**(86) Pedido PCT:** PCT EP2013063931 de 02/07/2013

**(87) Publicação PCT:** WO 2014/006042 de 09/01/2014

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 30/12/2014

**(57) Resumo:** PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE CLÍNQUER DE CIMENTO A PARTIR DE FARINHA CRUA DE CIMENTO, E INSTALAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE CLÍNQUER DE CIMENTO A PARTIR DE FARINHA CRUA DE CIMENTO. A presente invenção se refere a um processo e a uma instalação para a produção de clínquer de cimento a partir de farinha crua de cimento, em que: uma parte da farinha crua de cimento é preaquecida em um dispositivo de preaquecimento do calcinador e a outra parte da farinha crua de cimento é preaquecida em um dispositivo de preaquecimento do forno; a farinha crua de cimento preaquecida é precalcificada em um calcinador operado de acordo com o processo de Oxyfuel; a farinha crua de cimento pré-calcificada é cozida em um forno; a farinha crua de cimento cozida é resfriada em um dispositivo de resfriamento; o dispositivo de preaquecimento do calcinador é operado com gases residuais de escape do calcinador e o dispositivo de preaquecimento do forno é operado com gases residuais de escape do forno; em que como calcinador é usado um reator de leito fluidizado, em que uma parte dos gases residuais de escape do calcinador a pós o uso no dispositivo de preaquecimento do (...).

PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE CLÍNQUER DE CIMENTO A PARTIR DE FARINHA CRUA DE CIMENTO

[001] A presente invenção se refere a um processo e a uma instalação para a produção de clínquer de cimento, em que farinha crua de cimento é preaquecida, calcinada e subsequentemente cozida em um forno de modo a formar clínquer de cimento.

[002] Durante a produção de clínquer de cimento são obtidos aprox. 0,53 kg CO<sub>2</sub>/kg de clínquer a partir da calcinação da farinha crua e aprox. 0,26 kg CO<sub>2</sub>/kg - 0,29 kg CO<sub>2</sub>/kg de clínquer a partir da combustão do combustível necessário. As referidas quantidades de CO<sub>2</sub> habitualmente são emitidas para a atmosfera. Em função das etapas de preaquecimento em ciclone e das perdas de radiação ou das perdas de convecção, o consumo de energia combustível específica é de 2800 kJ/kg - 3200 kJ/kg de clínquer. Por este motivo são discutidos processos, nos quais o CO<sub>2</sub> gerado é significativamente concentrado nos gases de residuais escape e nos quais o CO<sub>2</sub> subsequentemente é liquefacto e permanentemente armazenado em formações geológicas adequadas ou usado para outros fins.

[003] A DE 10 2008 023 899 B4 descreve um processo para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> durante a produção de clínquer de cimento, no qual um componente de material rico em calcário e um componente de material pobre em calcário são preaquecidos em dispositivos de preaquecimento separados, calcinados em um calcinador comum e subsequentemente cozidos em um forno para formar clínquer de cimento. Neste caso os gases residuais de escape do calcinador são usados para o preaquecimento do componente de

material rico em calcário no dispositivo de preaquecimento e os gases residuais de escape do forno são usados para o preaquecimento do componente de material pobre em calcário no dispositivo de preaquecimento. Além disso para a combustão no calcinador são introduzidos combustível e oxigênio puro de modo que é gerado um gás residual de escape do calcinador, o qual contém sobretudo dióxido de carbono assim como vapor de água. O gás residual de escape do dispositivo de preaquecimento para o preaquecimento do componente de material rico em calcário é pelo menos parcialmente recirculado para o calcinador como o gás circulado, para aí ser entregue como gás portador.

[004] Da WO 2008/059378 A2 é conhecido um processo para a produção de cimento no qual a farinha crua em primeiro lugar é preaquecida com gás residual de escape do forno tubular rotativo (1100 °C - 1300 °C) e subsequentemente separada no lado do gás do gás residual de escape do forno é em grande parte calcinada por meio de um aquecimento de Oxyfuel no calcinador. No caso do aquecimento de Oxyfuel em vez de ar é usado oxigênio como agente oxidante, o qual pode ser produzido por meio de um dos processos discutidos para a produção de oxigênio (processo criogênico, processo adsorativo, processo de membrana). Deste modo é gerado um gás residual de calcinador rico em CO<sub>2</sub>. Por meio de um ciclone a farinha crua é separada do gás de fumaça de Oxyfuel e introduzida no forno tubular rotativo. O gás residual de escape do calcinador tem de ser resfriado para subsequentemente reconduzir um fluxo parcial para a combustão de Oxyfuel. Durante o resfriamento do gás de fumaça pode ser produzido por exemplo vapor de processo ou vapor para a

produção de energia. Um uso da referida natureza do gás residual de escape proveniente do calcinador no entanto requer um consumo de energia combustível significativamente aumentado para a produção de cimento, considerando que neste caso o gás residual de escape não é usado para o preaquecimento da farinha crua. Em comparação com a produção de cimento convencional o consumo de energia combustível possivelmente seria aumentado em até 70% para acima de 5000 kJ/kg de clínquer. Além disso a prática operacional demonstra que um permutador de calor no caso de temperaturas de entrada de gás de 850 °C - 950 °C e simultaneamente elevadas cargas de pó de algumas centenas de gramas por metro cúbico é dificilmente operável: o pó é fortemente aderente e devido às temperaturas elevadas não consegue ser limpo. Os métodos de limpeza convencionais neste caso falham devido às temperaturas elevadas e aos enfraquecimentos de material resultantes destas.

[005] Na WO 2010/046345 é sugerido usar um calcinador de acordo com o princípio do leito fluidizado estacionário em vez do calcinador concebido como reator de leito fluidizado. Considerando que assim não é necessário qualquer transporte pneumático da farinha crua no interior do calcinador, este conceito permite funcionar sem ou apenas com muito pouca recirculação de gás de fumaça. Por conseguinte não tem de ser resfriada ou apenas tem de ser resfriada uma quantidade muito reduzida de gás de fumaça e recirculada e o gás residual de escape conforme habitual pode ser usado para o preaquecimento da matéria-prima. O consumo de energia combustível por conseguinte no caso do referido processo não é superior ou apenas é ligeiramente superior do que no caso

da produção clássica de cimento com um forno de preaquecimento.

[006] Devido a uma forma de realização do calcinador como leito fluidizado estacionário é introduzida uma quantidade significativamente mais reduzida de farinha quente pré-calcinada no trajeto do gás de fumaça de Oxyfuel a resfriar. Por conseguinte podem ser minimizados possíveis efeitos de recarbonatação. O calor do gás de fumaça de Oxyfuel é usado como fonte de calor para uma unidade de pós-combustão para a absorção do CO<sub>2</sub> do gás residual de escape proveniente do forno e a dessorção subsequente do CO<sub>2</sub> relativamente puro da solução de lavagem. Neste caso como fonte de calor adicional para a dessorção é igualmente usado o calor residual do fluxo de ar residual do dispositivo de resfriamento.

[007] Contudo uma análise detalhada do conceito de leito fluidizado demonstra que um calcinador de leito fluidizado apesar da operação unicamente com oxigênio iria requerer superfícies de seção transversal muito grandes, considerando que no caso da farinha crua tipicamente muito fina mesmo a velocidades de gás muito reduzidas já não é possível ajustar nenhum leito fluidizado estacionário. Por conseguinte já não seria assegurada a vantagem da recarbonatação reduzida, sendo que predominariam as desvantagens do leito fluidizado sob a forma de volumes de construção muito grandes e perdas de pressão elevadas.

[008] Por conseguinte a presente invenção tem por objetivo melhorar o processo e a instalação para a produção de clínquer de cimento de forma a alcançar uma separação de CO<sub>2</sub> mais elevada sem aumentar significativamente

o consumo de combustível.

[009] De acordo com a presente invenção o referido objetivo é alcançado através das características da reivindicação 1 e 10.

[010] O processo para a produção de clínquer de cimento a partir de farinha crua de cimento de acordo com a presente invenção consiste em:

- uma parte da farinha crua de cimento ser preaquecida em um dispositivo de preaquecimento do calcinador e a outra parte da farinha crua de cimento ser preaquecida em um dispositivo de preaquecimento do forno;

- a farinha crua de cimento preaquecida no dispositivo de preaquecimento do calcinador (2) e no dispositivo de preaquecimento do forno (3) ser pré-calcinada em um calcinador operado de acordo com o processo de Oxyfuel;

- a farinha crua de cimento pré-calcinada ser cozida em um forno;

- a farinha crua de cimento cozida ser resfriada em um dispositivo de resfriamento;

- o dispositivo de preaquecimento do calcinador ser operado com gases residuais de escape do calcinador provenientes do calcinador, e;

- o dispositivo de preaquecimento do forno ser operado com gases residuais de escape do forno provenientes do forno,

[011] caracterizado por ser usado um reator de leito fluidizado como calcinador, em que uma parte dos gases residuais de escape do calcinador é recirculada para o calcinador após o uso no dispositivo de preaquecimento do calcinador, e;

[012] os gases residuais de escape do forno estarem sujeitos a uma separação pós-combustão de CO<sub>2</sub>.

[013] A instalação para a produção de clínquer de cimento a partir de farinha crua de cimento de acordo com a presente invenção consiste em:

- um dispositivo de preaquecimento do calcinador para o preaquecimento de uma primeira parte da farinha crua de cimento;

- um dispositivo de preaquecimento do forno para o preaquecimento de uma segunda parte da farinha crua de cimento;

- um calcinador para a pré-calцинаção da farinha crua de cimento preaquecida no dispositivo de preaquecimento do calcinador (2) e no dispositivo de preaquecimento do forno (3);

- um forno para a cozedura da farinha crua de cimento pré-calcinada;

- um dispositivo de resfriamento para o resfriamento da farinha crua de cimento cozida;

- em que o dispositivo de preaquecimento do calcinador é operado com gases residuais de escape do calcinador provenientes do calcinador, e;

- o dispositivo de preaquecimento do forno é operado com os gases residuais de escape do forno provenientes do forno,

- caracterizada por o calcinador ser concebido como reator de leito fluidizado e estar equipado com meios para a recirculação de uma parte dos gases residuais de escape do calcinador após o uso no dispositivo de preaquecimento do calcinador, e;

- uma unidade de pós-combustão para a separação de CO<sub>2</sub> estar disposta a jusante dos gases residuais de escape do forno após o dispositivo de preaquecimento do forno.

[014] Por um calcinador operado de acordo com o processo de Oxyfuel no âmbito da presente invenção se deve entender um calcinador, no caso do qual são usados combustível e ar de combustão com um teor de oxigênio de pelo menos 75% em moles, preferencialmente pelo menos 95% em moles.

[015] Uma forma de realização do calcinador como reator de leito fluidizado convencional com retorno dos gases de fumaça é significativamente mais simples de realizar. Além disso as experiências demonstraram que os efeitos de recarbonatação no interior do gás residual de escape do calcinador são menos significativos do que o esperado.

[016] As demais formas de realização da presente invenção são objeto das reivindicações dependentes.

[017] No caso da unidade de pós-combustão preferencialmente se trata de um dispositivo de despoluição de gases de fumaça, no qual é introduzido um solvente pobre em CO<sub>2</sub>, o qual preferencialmente absorve CO<sub>2</sub> e por conseguinte libera o gás de fumaça do CO<sub>2</sub>. O solvente rico em CO<sub>2</sub> volta a ser liberado do CO<sub>2</sub> com o auxílio de calor residual de processo, para poder ser novamente introduzido como solvente pobre em CO<sub>2</sub> para a absorção de CO<sub>2</sub> de forma a poder ser operado em um circuito.

[018] Alternativamente pode igualmente se tratar de unidades de pós-combustão com base em matéria sólida, nas quais o CO<sub>2</sub> contido no gás de fumaça reage com

uma matéria sólida para formar uma ligação carbonatada e este carbonato volta a ser calcinado mediante o uso do calor residual de processo (o chamado *Carbonate-Looping*). Neste caso preferencialmente se trata de carbonatos de cálcio, de magnésio e de sódio. Por conseguinte poderia igualmente ser usada farinha crua de cimento em si. Contudo para o calor de regeneração no caso do princípio *Carbonate-Looping* seria expectável um nível de temperatura significativamente mais elevado.

[019] De acordo com uma forma de realização particular da presente invenção a necessidade de calor da separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> é pelo menos parcialmente, preferencialmente totalmente, satisfeita pelo calor residual de uma parte dos gases residuais de escape do calcinador, dos gases residuais de escape do forno e/ou de um gás residual de escape do dispositivo de resfriamento proveniente do dispositivo de resfriamento. Neste caso a necessidade de calor da separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> pode ser parcialmente satisfeita pelo calor residual da parte não recirculada dos gases residuais de escape do calcinador após o uso no dispositivo de preaquecimento do calcinador ou ser parcialmente satisfeita pelo calor residual dos gases residuais de escape do forno após o uso no dispositivo de preaquecimento do forno.

[020] Além disso pode estar previsto que a parte recirculada para o calcinador dos gases residuais de escape do calcinador seja diretamente ou indiretamente aquecida por meio dos gases residuais de escape do dispositivo de resfriamento provenientes do dispositivo de resfriamento. A parte não recirculada dos gases residuais de

escape do calcinador preferencialmente é sujeita a uma separação de CO<sub>2</sub>, particularmente a uma liquefação de CO<sub>2</sub>. Em regra o gás residual de escape do calcinador antes da separação por meio de diferentes fontes de despoluição não apresenta uma pureza suficiente para o transporte subsequente e para o armazenamento/uso. Por conseguinte, em regra, no fluxo a separar, a pureza de CO<sub>2</sub> tem de voltar a ser aumentada. Assim são sugeridos processos já discutidos, nos quais é usada uma separação de fases simples ou múltipla, em que na fase líquida em relação ao fluxo de massa está contido sobretudo CO<sub>2</sub>, enquanto na fase gasosa se acumulam os elementos de difícil liquefação tais como por ex. oxigênio, nitrogênio e argônio. Contudo a referida fase gasosa ainda contém concentrações elevadas de CO<sub>2</sub>. Por conseguinte é útil quando o referido fluxo de fase gasosa - igualmente designado por *Vent-Gas* -, é introduzido conjuntamente com o gás residual de escape do forno da separação pós-combustão de CO<sub>2</sub>. De acordo com uma forma de realização particular o gás residual de escape do calcinador após o uso no dispositivo de preaquecimento do calcinador e/ou o gás residual de escape do forno após o uso no dispositivo de preaquecimento do forno são introduzidos em uma caldeira de calor residual para a produção de vapor de processo (vapor de água), em que o vapor de processo gerado é usado na separação pós-combustão de CO<sub>2</sub>.

[021] Além disso se pretende conciliar o processo de Oxyfuel e a separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> de forma que se ajusta um estado energeticamente ótimo para a separação de CO<sub>2</sub> aproximadamente total. O referido estado se ajusta quando o calor residual de processo existente do gás residual de escape do calcinador não recirculado, do gás

residual de escape do forno e/ou de um gás residual de escape do dispositivo de resfriamento proveniente do dispositivo de resfriamento podem ser totalmente usados para a separação pós-combustão de CO<sub>2</sub>. Um excedente de calor de processo existente neste caso poderia ser compensado por meio de uma redução do grau de calcinação no calcinador e no respectivo dispositivo de preaquecimento. Isto apresentaria a vantagem da poupança de energia no caso da disponibilização de oxigênio aí usada. Por meio de calor residual existente suficiente pode ser separado o CO<sub>2</sub> frequentemente existente no gás residual de escape do forno.

[022] Pelo contrário uma falta de calor de processo existente poderia ser compensada por meio de um aumento do grau de calcinação no calcinador e no respectivo dispositivo de preaquecimento. Subsequentemente no caso de um excedente de calor de processo é aumentado o teor de CO<sub>2</sub> no gás residual de escape do forno, enquanto no caso de uma falta de calor de processo é reduzido o teor de CO<sub>2</sub> no calor residual de escape do forno. Para variar o grau de calcinação existem dois parâmetros de ajuste: Por meio de quantidades de combustível mais elevadas ou mais reduzidas no calcinador pode ser aumentado ou reduzido o grau de calcinação na saída do calcinador. Por meio de quantidades de material inicial mais elevadas ou mais reduzidas no dispositivo de preaquecimento do forno pode ser aumentado ou reduzido o grau de calcinação da matéria-prima no calcinador e no respectivo dispositivo de preaquecimento.

[023] As demais vantagens e formas de realização da presente invenção serão mais detalhadamente explicadas com base na descrição que se segue e nas figuras.

[024] Nas figuras a:

[025] Fig. 1 apresenta uma representação esquemática de uma instalação para a produção de clínquer de cimento de acordo com a presente invenção com preparação de CO<sub>2</sub> comum;

[026] Fig. 2 apresenta uma representação esquemática de uma instalação para a produção de clínquer de cimento de acordo com a presente invenção com preparação de CO<sub>2</sub> separada;

[027] Fig. 3 uma representação esquemática da unidade de pós-combustão para a separação de CO<sub>2</sub>, e;

[028] Fig. 4 uma representação esquemática da caldeira de calor residual.

[029] No caso da instalação para a produção de clínquer de cimento representada na Fig. 1 a farinha crua de cimento 1 é preaquecida em dois dispositivos de preaquecimento separados no lado do gás, nomeadamente em um dispositivo de preaquecimento do calcinador 2 e em um dispositivo de preaquecimento do forno 3 e farinha preaquecida 4 subsequentemente é pré-calcinada em um calcinador 5 concebido como reator de leito fluidizado. O referido calcinador é operado de acordo com o processo de Oxyfuel com combustível 6 e com gás de combustão 7. No exemplo de realização representado o gás de combustão é formado por uma mistura de uma parte recirculada 17a do gás residual de escape do calcinador 17 e de um fluxo de gás rico em oxigênio 18 produzido em uma unidade de separação de gases do ar 8 de acordo com um dos métodos convencionais (separação de gases do ar criogênica, métodos adsorptivos, tecnologia de membranas), com um teor de oxigênio de pelo menos 75% em

moles, preferencialmente pelo menos 95% em moles. Nos processos criogênicos convencionais o consumo de energia elétrica está compreendido entre 250 kWh/t<sub>o2</sub> e 300 kWh/t<sub>o2</sub> no caso de uma unidade de oxigênio de aprox. 99,5%. Quando os requisitos de pureza para o oxigênio são mais reduzidos o consumo de energia elétrica pode ser reduzido. Devido a uma integração melhorada e por exemplo o uso da chamada tecnologia de três colunas o consumo de energia elétrica pode ser reduzido até para 160 kWh/t<sub>o2</sub>.

[030] A farinha crua de cimento pré-calcinada 9 subsequentemente é introduzida em um forno 10 concebido como forno tubular rotativo, no qual é aquecida até atingir 1300 °C - 1500 °C, ser totalmente calcinada e reagir de forma a atingir as fases de clínquerização características. No dispositivo de resfriamento 12 subsequente o clínquer de cimento 11 quente subsequentemente é resfriado para 50 °C - 250 °C. No caso do conceito sugerido o resfriamento do clínquer é realizado com gás de resfriamento 13, sendo gerado gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 14, 15 e 16 quente de diferentes temperaturas. O gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 14 mais quente é formado no início do dispositivo de resfriamento do clínquer 12, diretamente ligado ao forno tubular rotativo 10. É usado como ar de combustão na combustão em forno convencional como chamado ar secundário. O gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 15 de uma parte central do dispositivo de resfriamento do clínquer 12 (ar central) é usado para o preaquecimento do gás de combustão 7 em um permutador de calor 19 indirecto. Quando se pressupõe uma diferença de temperatura mínima no referido permutador de

calor é gerada uma parte energeticamente ótima de gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 15 (ar central) para o preaquecimento do gás de combustão 7 composto pela parte recirculada 17a do gás residual de escape do calcinador 17 e do fluxo de gás 18 rico em oxigênio, que neste caso é preaquecido até atingir 700 °C.

[031] É igualmente concebível uma solução construtivamente mais simples no caso da qual o gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 15 (ar central) é retirado do dispositivo de resfriamento sem separação espacial com o gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 16, para ser usado para o preaquecimento do gás de combustão 7 em um permutador de calor 19 indireto. Conseqüentemente o gás de mistura de gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 15 e 16 apresentaria uma temperatura significativamente mais reduzida e o gás de combustão 7 correspondentemente apenas poderia ser preaquecido para valores reduzidos.

[032] Alternativamente seria igualmente concebível que o gás de combustão 7 composto pela parte recirculada 17a do gás residual de escape do calcinador 17 e pelo fluxo de gás 18 rico em oxigênio fosse introduzido no dispositivo de resfriamento do clínquer como parte do gás de resfriamento 13, para posteriormente usar o gás residual de escape do dispositivo de resfriamento resultante diretamente como gás de combustão 7 preaquecido no calcinador. No caso da referida alternativa o gás de combustão seria diretamente preaquecido até atingir 1000 °C por meio do clínquer de cimento quente. Contudo a referida opção implica recursos construtivos elevados em relação ao dispositivo de

resfriamento.

[033] O gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 15 que sai do permutador de calor 19 assim como o restante gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 16 do dispositivo de resfriamento do clínquer 12 podem ser usados para produzir vapor de processo 25 na caldeira de calor residual 20 para a disponibilização de calor a uma unidade de pós-combustão 21 para a separação de CO<sub>2</sub>. O gás residual de escape do dispositivo de resfriamento resfriado 13' na caldeira de calor residual 20 pode ser usado por exemplo em um moinho de cru 26 para a secagem do material cru de cimento ou da farinha crua de cimento 1.

[034] No forno 10 é queimado combustível 22 por meio de ar secundário preaquecido (= ar residual 14) e de uma parte de ar primário não preaquecido e depois de sair do forno passa para o dispositivo de preaquecimento do forno 3 como gás residual de escape do forno 23. Após o uso no dispositivo de preaquecimento do forno 3 o gás residual de escape do forno 23 pode servir para a disponibilização de calor em uma caldeira de calor residual 24 para o vapor de processo 25 necessário na unidade de pós-combustão 21.

[035] O gás residual de escape do forno resfriado 23 e o gás residual de escape do dispositivo de resfriamento resfriado 13' neste caso após a caldeira de calor residual 24 ou 20 ainda tem de possuir calor sensível suficiente para, no caso de um funcionamento composto, quer dizer no caso do uso do moinho de cru 26, conjuntamente assegurarem a secagem necessária da farinha crua de cimento 1. No caso do funcionamento direto, o moinho de cru 26 não é usado de modo que o gás residual de escape do forno ou o gás

residual de escape do dispositivo de resfriamento resfriado são introduzidos em um dispositivo de resfriamento 27 sem que lhe possa ser retirado calor residual adicional para o uso. Subsequentemente ao moinho de cru 26 ou ao dispositivo de resfriamento 27 o gás residual de escape 23 é introduzido em um filtro de despoeiramento 28 para pós-tratamento. O gás residual de escape 23 despoluído de pó subsequentemente opcionalmente é introduzido em uma unidade de dessulfuração de gases de fumaça 29, antes de ser finalmente introduzido na unidade de pós-combustão 21. A unidade de dessulfuração de gases de fumaça neste caso pode ser operada de acordo com um conceito químico por via úmida típico, conforme é habitual no caso da dessulfuração de gases de fumaça em centrais carboníferas. Naturalmente é igualmente possível que o gás residual de escape seja simultaneamente despoluído de pó e de enxofre em uma chamada dessulfuração de gases de fumaça semi-seca. Neste caso antes de um filtro é introduzido um sorvente umedecido conjuntamente com pó do filtro recirculado e humedecido no gás residual de escape. O referido filtro substituiria o filtro de despoeiramento 28 e a unidade de dessulfuração de gases de fumaça 29. Para aumentar a eficácia de uma dessulfuração de gases de fumaça semi-seca da referida natureza, o filtro de despoeiramento pode igualmente ser constituído por duas unidades 28a e 28b. Neste caso no primeiro filtro 28a o gás de fumaça seria despoluído de pó e o sorvente seria introduzido no gás residual de escape despoluído de pó após o filtro 28a, separado no filtro 28b e parcialmente recirculado. Eventualmente o teor residual de SO<sub>x</sub> poderia ser adicionalmente reduzido num dispositivo de lavagem fina a jusante, por exemplo um dispositivo de lavagem

de NaOH.

[036] No caso mais conveniente são suficientes as medidas primárias, tais como escalonamentos de ar adequados durante a combustão para uma redução de NO<sub>x</sub> suficiente assim como para a separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> de gás ácido indesejado no gás residual de escape. Quando não é o caso, a redução tem de ser assegurada por medidas secundárias adequadas. No caso mais conveniente para este efeito é suficiente uma remoção de nitrogênio por meio de SNCR (redução não catalítica seletiva), no caso da qual a temperaturas adequadas (900 °C - 1100 °C) o teor de NO<sub>x</sub> do gás residual de escape é reduzido em uma porção de gás residual de escape por meio de uma injeção de amoníaco ou de ureia. No caso mais inconveniente a redução de NO<sub>x</sub> tem de ser realizada por meio de SCR (redução catalítica seletiva), na qual a remoção é realizada de forma catalítica por meio da injeção de amoníaco ou de ureia a 300 °C - 450 °C. Para a caldeira de calor residual 24 eventualmente subsequente tem de ser considerada a formação de sulfatos de amônio no amoníaco introduzido na SNCR ou SCR e no SO<sub>3</sub> existente no gás de fumaça. A partir do sulfato de amônio se pode formar uma deposição fortemente corrosiva nas superfícies de aquecimento da caldeira. Por conseguinte alternativamente poderia igualmente ser considerado um processo SCR após a saída do gás de fumaça da REA. Por meio de um sistema de deslocamento de calor adequado no entanto o gás de fumaça teria de voltar a ser aquecido até atingir uma temperatura adequada para o processo, para posteriormente ser novamente resfriado na caldeira de calor residual 24 existente no lado do gás de fumaça atrás da dessulfuração e da remoção de nitrogênio.

[037] O gás residual de escape do calcinador rico em CO<sub>2</sub> 17 do calcinador 5 é resfriado no dispositivo de preaquecimento do calcinador 2 separado do dispositivo de preaquecimento do forno 3. Para a recirculação de uma parte 17a do calor residual de escape do calcinador com um ventilador de recirculação o gás residual de escape do calcinador convenientemente primeiro tem de ser resfriado até atingir uma temperatura aceitável para o ventilador. Isto pode ser realizado em uma caldeira de calor residual adicional 30, a qual usa a entalpia do gás residual de escape do calcinador para uma produção adicional de vapor de processo para a separação pós-combustão de CO<sub>2</sub>. Contudo ainda é mais conveniente quando o dispositivo de preaquecimento do calcinador é concebido e operado de modo que no gás residual de escape do calcinador após a passagem pelo dispositivo de preaquecimento do calcinador ainda persista a temperatura adequada para o ventilador de recirculação de aproximadamente 380 °C a 450 °C, caso em que se poderia suprimir a caldeira de calor residual 30.

[038] Uma parte 17a do gás residual de escape do calcinador 17 é recirculada para a manutenção do circuito de fluxo no calcinador 5. A parte não recirculada 17b pode ser resfriada em uma caldeira de calor residual adicional 31, para usar o calor para a produção de vapor de processo 25 para a unidade de pós-combustão 21. Para melhorar a transferência de calor pode ser útil conectar um ou vários ciclones de alto rendimento a montante da caldeira de calor residual de modo que o gás residual de escape do calcinador 17 é purificado de forma a apresentar teores de pó inferiores a 10 g/Nm<sup>3</sup>, preferencialmente de forma a apresentar teores de

pó inferiores a  $1 \text{ g/Nm}^3$ . Contudo o mais tardar após o resfriamento na caldeira de calor residual 31 em um filtro de pó 32b é realizada uma despoluição de pó quase total para valores inferiores a  $100 \text{ mg/Nm}^3$ , preferencialmente inferiores a  $20 \text{ mg/Nm}^3$ .

[039] Alternativamente a caldeira de calor residual 30 pode ser suprimida pelo fato de ser introduzido gás de fumaça Oxyfuel frio 17c como gás de resfriamento rápido no calcinador, para alcançar a temperatura admissível para o ventilador de recirculação. Pode ser instalado um filtro de despoeiramento 32a antes da caldeira de calor residual 31, eventualmente igualmente antes da conexão de recirculação. Neste caso uma grande parte do calor no gás de fumaça Oxyfuel 17 poderia ser usada na caldeira de calor residual 31 pelo fato de uma carga reduzida do gás de fumaça com o pó fortemente aderente facilitar significativamente a transformação técnica do uso do calor residual.

[040] A unidade de pós-combustão 21 é detalhadamente representada na Fig. 3 e pode ser constituída por um circuito de solvente, no qual como solvente é usada por exemplo monoetanolamina (MEA). Atualmente está a ser desenvolvida e testada uma pluralidade de agentes solventes. A presente invenção é explicitamente aplicável a qualquer outro solvente. O gás residual do forno 23 tratado no filtro de despoeiramento 28 e na unidade de dessulfuração de gases de fumaça 29 primeiro é resfriado em um dispositivo de resfriamento de gases de fumaça 210 até atingir aproximadamente  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , antes de ser introduzido em um absorvedor 211. No absorvedor se encontra um agente de lavagem pobre em  $\text{CO}_2$  216, o qual é composto por um solvente e

na maior parte dos casos água.

[041] O agente de lavagem pobre em CO<sub>2</sub> 216 no absorvedor 211 absorve até 98% de CO<sub>2</sub> do gás residual de escape do forno 23 resfriado. O gás residual 38 abandona o absorvedor em um estado relativamente pobre em CO<sub>2</sub>, saturado com água. O agente de lavagem carregado de CO<sub>2</sub> 216' é levado a atingir um nível de pressão mais elevado em função da pressão do desorvedor (a MEA ~2bar) desejada, opcionalmente preaquecido em um permutador de calor 212, abandona-o como agente de lavagem carregado de CO<sub>2</sub> preaquecido 216'' e é introduzido em um desorvedor 213, no qual o agente detergente é termicamente regenerado, pelo fato de o desorvedor ser aquecido no reservatório com o vapor de processo 25 gerado e desta forma o CO<sub>2</sub> é separado do agente de lavagem 216'' em várias etapas. No caso do MEA como solvente se deve contar com aproximadamente 3200-3600 kJ/kg<sub>CO2</sub> para satisfazer a necessidade de calor do desorvedor. O condensado resultante 25' do aquecimento do reservatório retorna para as caldeiras de calor residual 20, 24, 30, 31.

[042] Da unidade de pós-combustão 21 além do gás residual pobre em CO<sub>2</sub> e essencialmente rico em nitrogênio 38 sai um gás residual de escape rico em CO<sub>2</sub> 33, o qual subsequentemente é introduzido em um compressor de CO<sub>2</sub> próprio 36 (preparação de CO<sub>2</sub> separada de acordo com a Fig. 2) ou em uma unidade de condensação parcial de CO<sub>2</sub> comum 34 com o gás residual de escape do calcinador 17c (preparação de CO<sub>2</sub> comum de acordo com a Fig. 1). No último caso é conveniente quando o gás de produto rico em CO<sub>2</sub> o qual se encontra a uma pressão mais elevada da unidade de combustão 33 é conduzido exatamente para a etapa do compressor,

adequada para o nível de pressão. O nível de pressão no caso do solvente MEA se encontra por exemplo a aprox. 2 bar. A depuração de CO<sub>2</sub> do gás residual de escape 33 tipicamente é superior a 95%, preferencialmente superior a 99%.

[043] Integrado no e acima do desorvedor por meio de água de resfriamento (entrada 213a, saída 213b) em um chamado *Overhead-Condenser* (condensador desorvedor) uma grande parte da água volta a ser condensada, para manter reduzida a perda de água e a perda de solvente devido ao gás residual de escape rico em CO<sub>2</sub> 33. O agente de lavagem novamente pobre em CO<sub>2</sub> 216 é encaminhado para fora do reservatório do desorvedor 213, preaquece o agente de lavagem rico em CO<sub>2</sub> 216' no permutador de calor 212, é resfriado em um dispositivo de resfriamento 214 e retorna para o absorvedor 211 conjuntamente com a água 216b, a qual supostamente compensa a restante perda de água.

[044] A despoluição de pó no filtro de despoeiramento 28, a dessulfuração na unidade de dessulfuração de gases de fumaça 29 e eventualmente a remoção de nitrogênio repercutem-se no funcionamento e na disposição da unidade de pós-combustão 21 para a separação de CO<sub>2</sub> conectada a jusante. Muitos dos solventes sugeridos para este efeito, sobretudo aminas, estão sujeitos a mecanismos de degradação. Estas no gás residual de escape podem estar condicionadas termicamente, assim como por oxigênio e substâncias residuais (por ex. SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>). Por conseguinte são particularmente convenientes uma despoluição de pó, uma remoção de nitrogênio e uma dessulfuração adequadas, conforme acima referido. No *reclaimer* 215 para o agente de lavagem os solventes embora possam ser parcialmente regenerados, em

regra não podem ser totalmente regenerados, e além disso é necessário calor adicional. Em intervalos temporais ou continuamente é adicionado solvente fresco 216a (fluxo *make-up*) ao agente de lavagem 216 e no *reclaimer* 215 solvente regenerado de 216c de produtos de degradação.

[045] Assim é por exemplo indicado um fluxo de *make-up* necessário de 1,5 kg/t<sub>CO2</sub> a partir de séries experimentais para a lavagem MEA de gases de fumaça de centrais, embora o gás residual de escape a tratar devido a medidas específicas durante a dessulfuração de gases de escape (resfriamento de gases de escape e lavagem fina de SO<sub>2</sub> com NaOH) contenha partes residuais de SO<sub>x</sub> (< 4 ppm) muito reduzidas. No caso de concentrações de SO<sub>2</sub> convencionais em centrais de cimento de até 2000 ppm, devido à ausência do calcinador no trajeto do gás residual de escape do forno eventualmente até menos, se recorre a uma medida secundária para a dessulfuração de gases de fumaça para prevenir uma perda de solvente excessiva, por exemplo uma lavagem úmida com uma suspensão de pedra calcária, conforme habitualmente é usada para gases de fumaça de centrais. Um resfriamento de gases de fumaça e uma lavagem fina subsequentes por meio de uma solução de NaOH eventualmente pode reduzir adicionalmente o teor residual de SO<sub>2</sub>. A concentração de SO<sub>2</sub> na saída no lado do gás da dessulfuração de gases de escape neste caso deve ser reduzida para um mínimo, para minimizar tanto quanto possível a degradação do agente de lavagem. Desta forma pode igualmente ser minimizado o teor de pó residual. O pó residual após o filtro de despoeiramento pode por exemplo conduzir à acumulação no circuito do solvente da unidade de pós-combustão e eventualmente tem de ser separado do solvente

por meio de filtros. Convenientemente não deve descer abaixo dos 140 mg/Nm<sup>3</sup> no gás residual de escape antes da lavagem. É de esperar que devido às medidas adicionais para a redução de SO<sub>2</sub> no gás residual de escape o teor de pó seja minimizado.

[046] Alternativamente podem igualmente ser usados outros solventes, tais como por ex. soluções de NH<sub>3</sub> aquosas. Neste caso a lavagem de CO<sub>2</sub> é realizada a temperaturas significativamente mais reduzidas, tipicamente inferiores a 20 °C, preferencialmente inferior a 10 °C. A desvantagem do referido processo é o uso de um solvente tóxico e inflamável assim como os recursos energéticos elevados para o resfriamento dos gases de fumaça e do solvente. Neste caso teria de ser previsto por ex. um sistema de resfriamento de gases de fumaça eventualmente de várias etapas após a dessulfuração de gases de escape. A vantagem do referido processo é a estabilidade significativamente mais elevada da solução de NH<sub>4</sub>OH em comparação com MEA e uma necessidade de calor específico reduzida no desorvedor. Em função da carga de gases de escape neste caso eventualmente poderá ser suprimida a lavagem de gases de escape.

[047] Considerando as perdas de pressão e a temperatura do reservatório ou a pressão ótimos para o agente de lavagem do desorvedor 213 tem de ser gerado vapor de processo 25 com uma pressão suficiente (por ex. 3,5 bar para uma temperatura de vapor > 140 °C) para o aquecimento do reservatório. O condensado 25' do desorvedor 213 forma a água de alimentação, a qual é transportada para as caldeiras de calor residual individuais 20, 24, 30, 31 ou para um tambor de vapor comum às caldeiras de calor residual.

[048] As caldeiras de calor residual 20, 24,

30, 31 podem ser concebidas por exemplo como evaporador rotativo natural (ver Fig. 4), sendo igualmente concebíveis outras formas de realização. A caldeira de calor residual representada na Fig. 4 é constituída essencialmente por um tambor de vapor 201, um tubo de descida 202, uma parte aquecida 203 e um tubo de subida 204. Durante o funcionamento corre água do tambor de vapor 201 através do tubo de descida 202 para baixo e penetra na parte aquecida 203. A necessidade de calor para este efeito é satisfeita pelo calor residual do gás residual de escape do calcinador 17, do gás residual de escape do forno 23 e/ou de um gás residual de escape do dispositivo de resfriamento 15, 16 do dispositivo de resfriamento 12. A mistura de vapor de processo resultante sobe pelo tubo de subida 204 para cima e volta a penetrar no tambor de vapor 201. A diferença de densidade entre a mistura água-vapor no tubo de subida 204 e a água no tubo de descida 201 acciona o circuito. A partir do tambor de vapor 201 o vapor de processo 25 pode então ser retirado para a operação do reservatório no desorvedor 213.

[049] As caldeiras de calor residual 20, 24, 30, 31 alternativamente podem igualmente ser operadas com um tambor de vapor 201 comum. O vapor de processo 25 necessário é retirado do tambor comum e usado para o aquecimento do reservatório do desorvedor. Neste caso o condensado 25' do vapor de processo forma igualmente a água de alimentação, a qual é encaminhada para o tambor de vapor 201.

[050] Na conexão do calcinador a parte não recirculada 17b do gás residual de escape do calcinador que sai do filtro de despoeiramento 32b ou da caldeira de calor residual 31, eventualmente adicionalmente resfriada,

opcionalmente é sujeita a uma lavagem de gás de fumaça de SO<sub>2</sub> 35 subsequente, a qual tem de cumprir os requisitos específicos devido ao gás residual de escape do calcinador do processo de Oxyfuel. O gás residual de escape do calcinador o qual entra na despoluição de gases de fumaça 35 pode apresentar até ao triplo da concentração de SO<sub>x</sub> do gás residual de escape de processos de centrais de cimento convencionais. Para evitar problemas de corrosão durante a liquefação e para obter teores de SO<sub>x</sub> tanto quanto possível reduzidos no fluxo de CO<sub>2</sub> a armazenar, o restante teor de SO<sub>x</sub> tem de ser mantido mínimo. Durante uma lavagem úmida a absorção de SO<sub>2</sub> na suspensão de pedra calcária e a oxidação subsequente tem de ser realizadas em dois depósitos separados no lado do gás. Alternativamente também neste caso pode ser realizada uma despoluição de pó no filtro de despoeiramento 32a, 32b e a dessulfuração na despoluição de gases de fumaça 35 em uma unidade como despoluição de gases de fumaça semi-seca. Para evitar problemas de corrosão e obter um teor de NO<sub>x</sub> tanto quanto possível reduzido no fluxo de CO<sub>2</sub> a armazenar, também no gás residual de escape do calcinador o restante teor de NO<sub>x</sub> tem de ser mantido tanto quanto possível reduzido. As possibilidades para a minimização podem ser semelhantes àquelas para o gás residual de escape do forno (medidas primárias, SNCR, SCR). Uma remoção de nitrogênio SCR tanto pode ser instalada antes como igualmente depois da conexão de recirculação. Os sulfatos de amônio formados a partir de SO<sub>3</sub> e de NH<sub>3</sub> também neste caso podem favorecer uma deposição fortemente corrosiva nas superfícies de aquecimento na caldeira de calor residual 31 subsequente. Por conseguinte alternativamente pode igualmente ser realizada uma remoção de

nitrogênio do gás de fumaça por meio de SCR após a dessulfuração, depois do gás de fumaça ter sido novamente aquecido por exemplo por meio de um sistema de deslocamento de calor até atingir aprox. 250 °C - 350 °C. A caldeira de calor residual 31 neste caso seguir-se-ia à remoção de nitrogênio.

[051] O gás residual de escape do calcinador despoluído de pó, dessulfurado e eventualmente desprovido de nitrogênio subseqüentemente quer conjuntamente ou separadamente com ou do gás de produto rico em CO<sub>2</sub> 33 da unidade de pós-combustão 21 é introduzido em uma unidade de condensação parcial de CO<sub>2</sub> 36. Durante a liquefação do gás residual de escape do calcinador ou durante a liquefação comum do gás residual de escape do calcinador com o gás de fumaça rico em CO<sub>2</sub> da unidade de pós-combustão 21 em função da pureza desejada do CO<sub>2</sub> a armazenar e do gás de fumaça introduzido é gerado um fluxo residual rico em CO<sub>2</sub> 37 (*vent gas*), que tem de ser evacuado. A concentração de CO<sub>2</sub> do referido fluxo normalmente está compreendida entre 20% e 60%.

[052] O CO<sub>2</sub> do fluxo de *vent gas* no caso de calor de processo suficiente pode ser adicionalmente separado na unidade de pós-combustão 21. No caso da pós-combustão de preparação de CO<sub>2</sub> separada o fluxo de *vent gas* rico em CO<sub>2</sub> 37 da unidade de condensação parcial de CO<sub>2</sub> 34 pode ser adicionalmente introduzido na unidade de pós-combustão 21, liberado do CO<sub>2</sub> e o CO<sub>2</sub> adicionalmente separado pode ser introduzido no compressor de CO<sub>2</sub> 36, o que representa um aumento da taxa de separação total de CO<sub>2</sub>. No caso da pós-combustão de preparação de CO<sub>2</sub> comum (de acordo com a Fig. 1) o fluxo residual rico em CO<sub>2</sub> 37 da unidade de condensação

parcial de CO<sub>2</sub> 34 pode igualmente ser introduzido na unidade de pós-combustão 21, liberado do CO<sub>2</sub> e por conseguinte o CO<sub>2</sub> adicionalmente absorvido pode ser reconduzido para a unidade de condensação parcial de CO<sub>2</sub> 34. Neste caso pode igualmente ser alcançado um aumento da taxa de separação total de CO<sub>2</sub>. Eventualmente os poluentes devidos à entrada de ar falso e de excedente de oxigênio no gás residual de escape do calcinador 17c podem ser prevenidos de forma que com o fluxo rico em CO<sub>2</sub> da unidade de pós-combustão é alcançada uma concentração de CO<sub>2</sub> seca correspondente à concentração desejada para o transporte do CO<sub>2</sub> densificado. Neste caso a unidade de condensação parcial de CO<sub>2</sub> 34 original pode ser substituída por um compressor de CO<sub>2</sub> simples, tal como o 36. Neste caso não é gerado nenhum fluxo de *vent gas* e a totalidade do gás de fumaça que entra na unidade continua a ser transportado.

[053] A quantidade de vapor de processo 25 produzida pode ser adaptada por meio da qualidade do processo de Oxyfuel parcial no qual se baseia. Quanto mais elevada é a integração de processo do processo de Oxyfuel parcial, mais elevada é a respectiva eficácia e mais reduzido é o calor residual gerado. Quanto mais elevada é a eficácia mais complexo é o processo. Por conseguinte parece ser conveniente apenas operar a integração de processo do processo de Oxyfuel no qual se baseia de forma que seja gerado calor residual suficiente para uma separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> suficiente a partir do gás residual de escape do forno 23. Quando apesar de medidas de integração extremas (por exemplo muitas etapas de preaquecimento, aproveitamento máximo do calor do gás residual de escape do dispositivo de resfriamento) existe um excedente de calor residual, a combustão de Oxyfuel e por

consequente o grau de calcinação no calcinador 5 podem ser reduzidos de forma que, devido ao teor de calcinação residual aumentado e adicionalmente da potência de combustão aumentada no forno tubular rotativo 10, a quantidade de CO<sub>2</sub> no gás residual de escape do forno 23 é adaptada ao calor residual disponível. Deste modo pode ser reduzida a potência de combustão de Oxyfuel e por conseguinte poupada a energia elétrica para a decomposição de ar. Um efeito semelhante pode ser alcançado pela redução da parte de farinha crua de cimento nos dispositivos de preaquecimento. A farinha crua de cimento preaquecida na etapa de preaquecimento inferior está sujeita a uma temperatura mais elevada e por conseguinte a um grau de calcinação mais elevado. Uma parte da calcinação também neste caso é deslocada do calcinador 5 para o forno tubular rotativo 10 ou para o trajeto do gás residual de escape do forno.

LISTA DOS NÚMEROS DE REFERÊNCIA

1. Farinha crua de cimento
2. Dispositivo de preaquecimento do calcinador
3. Dispositivo de preaquecimento do forno
4. Farinha crua de cimento preaquecida
5. Calcinador
6. Combustível
7. Gás de combustão
8. Unidade de separação de gases do ar
9. Farinha crua de cimento pré-calcinada
10. Forno
11. Clínquer de cimento
12. Dispositivo de resfriamento
13. Gás de resfriamento

14. Gás residual de escape do dispositivo de resfriamento
15. Gás residual de escape do dispositivo de resfriamento
16. Gás residual de escape do dispositivo de resfriamento
17. Gás residual de escape do calcinador
  - a. Parte recirculada
  - b. Parte não recirculada
  - c. Parte não recirculada após despoluição de gás de fumaça
18. Fluxo de gás rico em oxigênio
19. Permutador de calor
20. Caldeira de calor residual
- 201 Tambor de vapor
- 202 Tubo de descida
- 203 Tubo de subida
21. Unidade de pós-combustão
210. Dispositivo de resfriamento do gás de fumaça
211. Absorvedor
212. Permutador de calor
213. Desorvedor
  - a. Entrada de água de resfriamento
  - b. Saída de água de resfriamento
214. Dispositivo de resfriamento
215. *Reclaimer*
216. Solvente pobre em CO<sub>2</sub>
  - a. Solvente fresco
  - b. Água *make-up*
  - c. Solvente regenerado

- 216' Solvente rico em CO<sub>2</sub>
- 22. Combustível
- 23. Gás residual de escape do forno
- 24. Caldeira de calor residual
- 25. Vapor de água
- 25' Condensado
- 26. Moinho de cru
- 27. Unidade de resfriamento
- 28. Filtro de despoeiramento
- 29. Unidade de dessulfuração dos gases de fumaça
- 30. Caldeira de calor residual
- 31. Caldeira de calor residual
- 32. Filtro de despoeiramento
- 33. Gás de fumaça rico em CO<sub>2</sub>
- 34. Unidade de condensação parcial de CO<sub>2</sub>
- 35. Despoluição de gases de fumaça
- 36. Compressor de CO<sub>2</sub>
- 37. Fluxo residual rico em CO<sub>2</sub>
- 38. Gás residual

REIVINDICAÇÕES

1. PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE CLÍNQUER DE CIMENTO A PARTIR DE FARINHA CRUA DE CIMENTO (1), em que:

a) uma parte da farinha crua de cimento (1) ser preaquecida em um dispositivo de preaquecimento do calcinador (2) e a outra parte da farinha crua de cimento (1) ser preaquecida em um dispositivo de preaquecimento do forno (3),

b) a farinha crua de cimento (4) preaquecida no dispositivo de preaquecimento do calcinador (2) e no dispositivo de preaquecimento do forno (3) ser precalcificada em um calcinador (5) operado de acordo com um processo na qual ar de combustão é usado com um teor de oxigênio de pelo menos 75% em moles,

c) a farinha crua de cimento pré calcificada (9) ser cozida em um forno (10),

d) a farinha crua de cimento cozida ser resfriada em um dispositivo de resfriamento (12),

e) o dispositivo de preaquecimento do calcinador (2) ser operado com gases residuais de escape do calcinador (17) provenientes do calcinador (5), e

f) o dispositivo de preaquecimento do forno (3) ser operado com gases residuais de escape do forno (23) provenientes do forno (10), caracterizado por

g) um reator de leito fluidizado ser usado como calcinador (5), em que uma parte (17a) dos gases residuais de escape do calcinador (17) é recirculada para o calcinador (5) após o uso no dispositivo de preaquecimento do calcinador (2), e

h) os gases residuais de escape do forno (23) estarem sujeitos a uma separação pós-combustão de CO<sub>2</sub>, em que

uma necessidade de calor da separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> ser satisfeita pelo calor residual da parte não recirculada (17b) dos gases residuais de escape do calcinador, dos gases residuais de escape do forno (23) e/ou de um gás residual proveniente do dispositivo de resfriamento (12).

2. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pela parte recirculada (17a) dos gases residuais de escape para o calcinador (5) ser aquecida por meio de gases residuais de escape do dispositivo de resfriamento (15) provenientes do dispositivo de resfriamento (12).

3. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pela necessidade de calor da separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> ser parcialmente satisfeita pelo calor residual da parte não recirculada (17b) dos gases residuais de escape do calcinador após o uso no dispositivo de preaquecimento do calcinador (2).

4. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pela necessidade de calor da separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> ser parcialmente satisfeita pelo calor residual dos gases residuais de escape do forno (23) após o uso no dispositivo de preaquecimento do forno (3).

5. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelos gases residuais de escape do calcinador (17) após o uso no dispositivo de preaquecimento do calcinador (2) e/ou os gases residuais de escape do forno (23) após o uso no dispositivo de preaquecimento do forno (3) serem introduzidos em uma caldeira de recuperação de calor (30, 24, 31) para a geração de vapor, em que o vapor de processo (25) é usado na separação pós-combustão de CO<sub>2</sub>.

6. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pela parte não recirculada (17b) dos gases residuais de escape do calcinador (17) ser sujeita a uma separação de CO<sub>2</sub> por meio de uma liquefação de CO<sub>2</sub> e um fluxo residual (37) contendo CO<sub>2</sub> resultante conjuntamente com os gases residuais de escape do forno serem sujeitos à separação pós-combustão de CO<sub>2</sub>.

7. PROCESSO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo processo na qual ar de combustão é usado com um teor de oxigênio de pelo menos 75% em moles e a separação pós-combustão de CO<sub>2</sub> serem coordenados um em relação ao outro de modo que o calor de processo disponível de pelo menos uma parte dos gases residuais de escape do calcinador (17), dos gases residuais de escape do forno (23) e/ou de um gás residual de escape proveniente do dispositivo de resfriamento (12) ser totalmente usado.

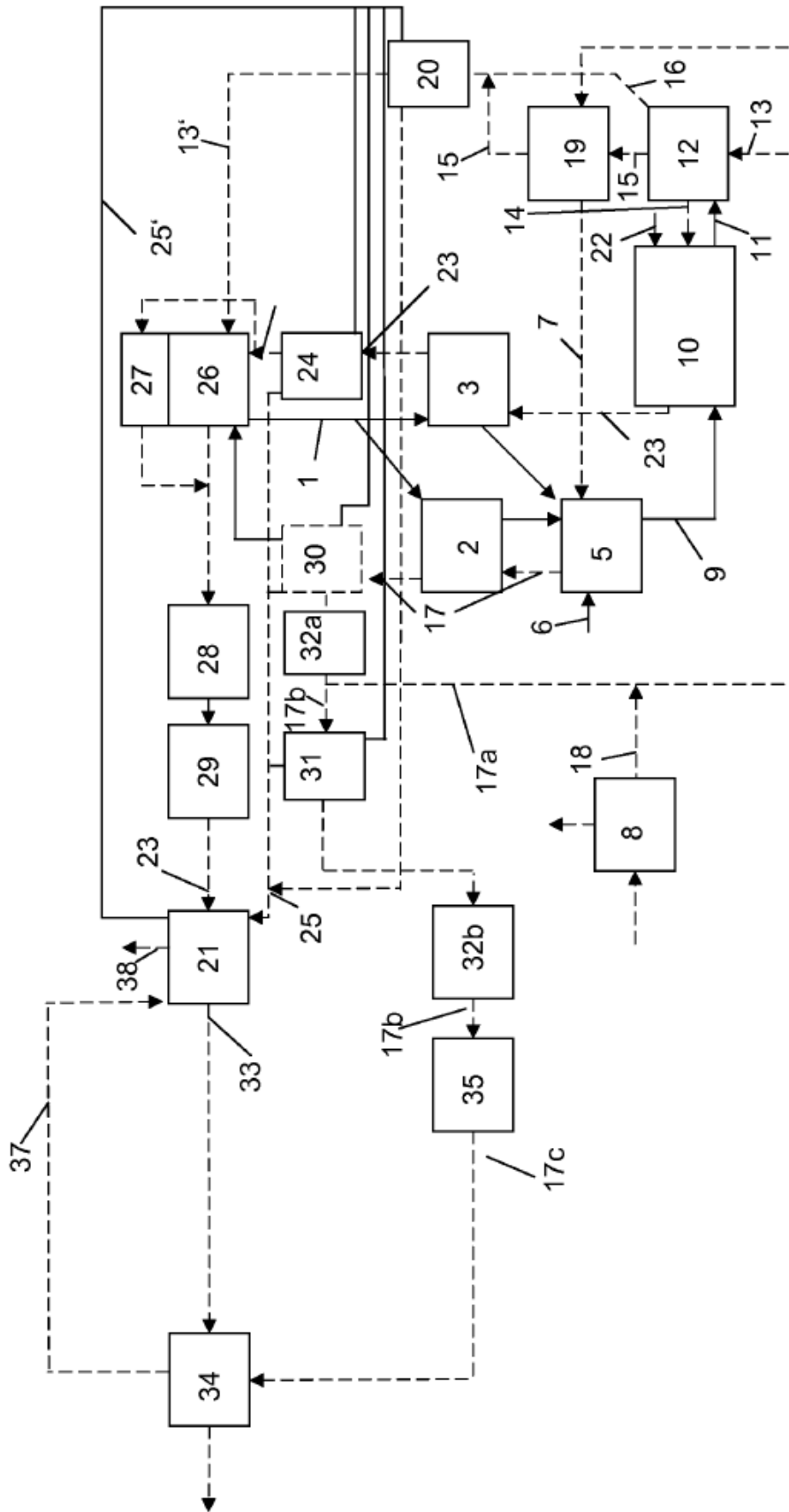


Fig. 1

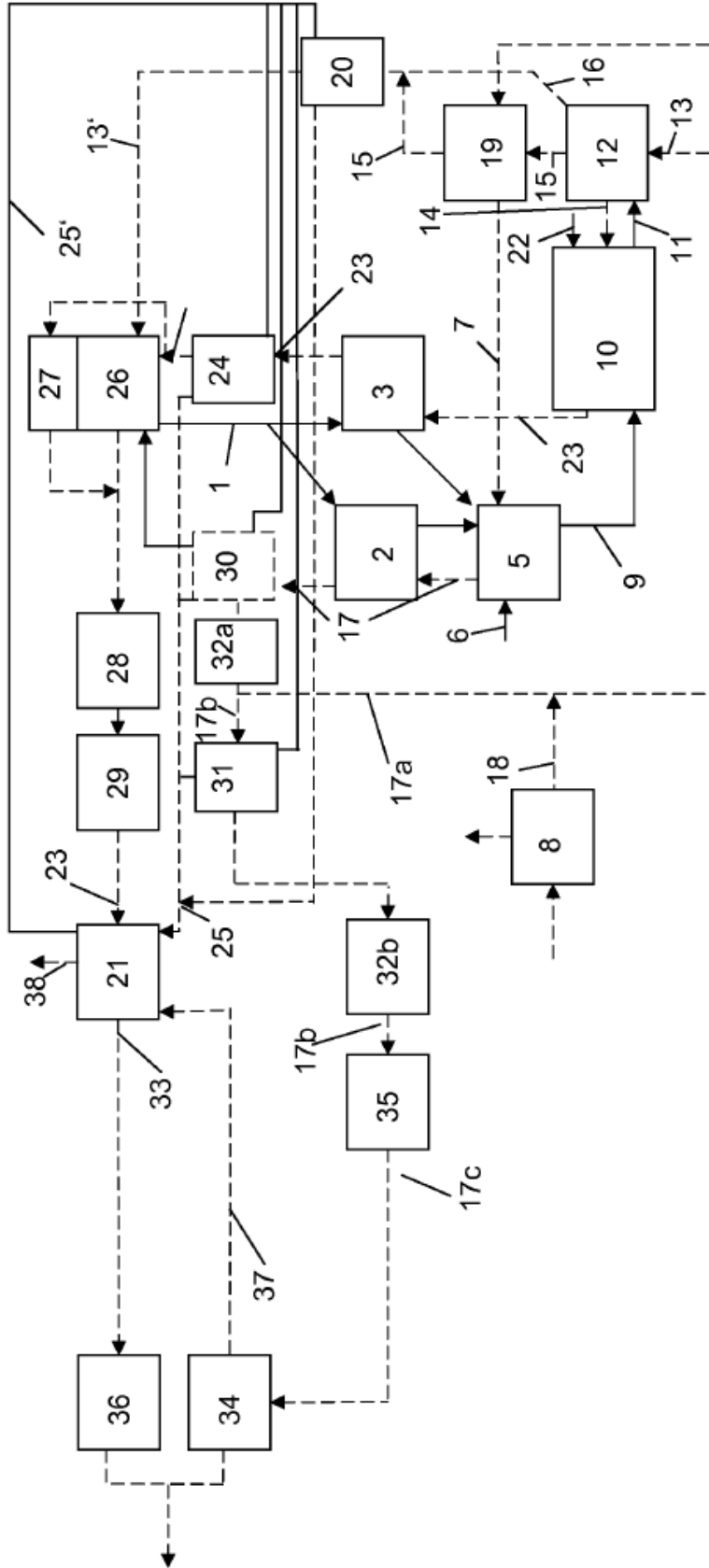


Fig. 2

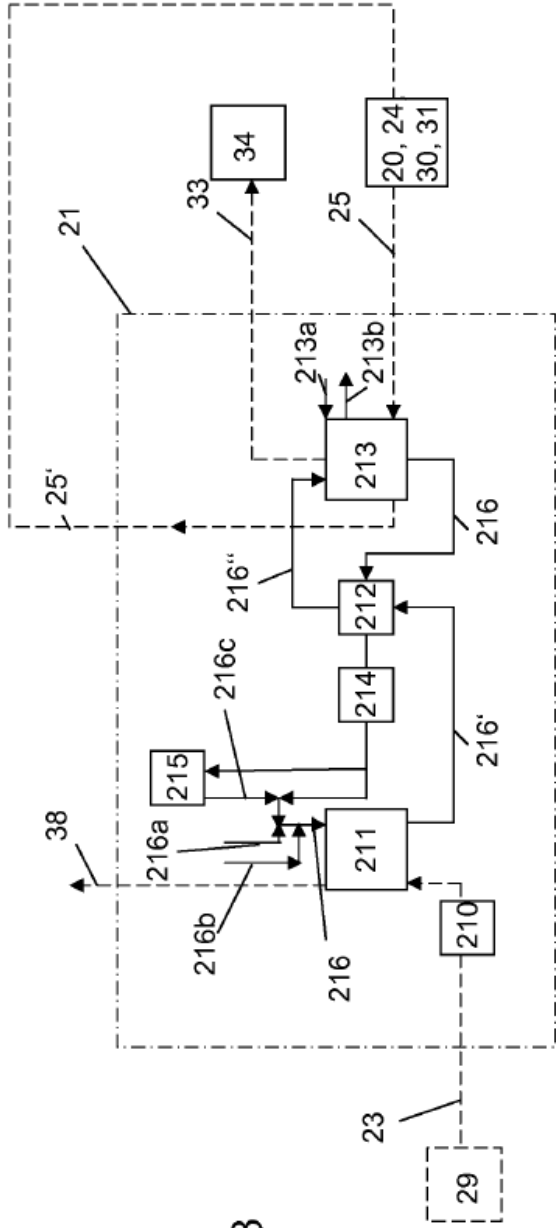


Fig. 3

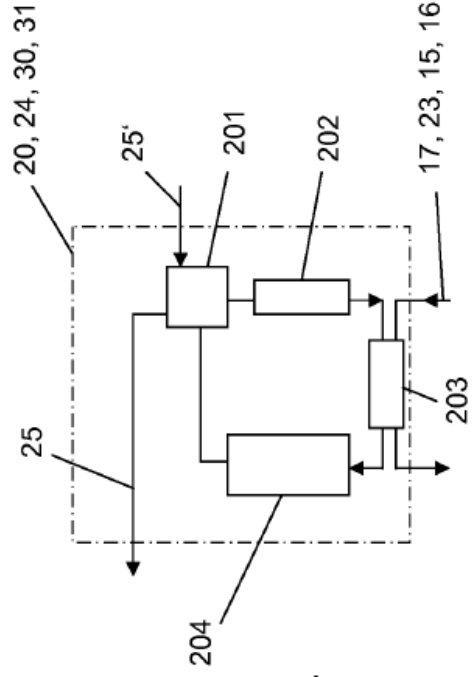


Fig. 4