

(19)



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Économie

(11)

N° de publication :

LU103200

(12)

BREVET D'INVENTION

B1

(21) N° de dépôt: LU103200

(51) Int. Cl.:
C01C 1/04, C25B 1/04

(22) Date de dépôt: 05/10/2023

(30) Priorité:

(43) Date de mise à disposition du public: 07/04/2025

(47) Date de délivrance: 07/04/2025

(73) Titulaire(s):

THYSSENKRUPP UHDE GMBH – 44141
DORTMUND (Allemagne), THYSSENKRUPP AG – 45143
Essen (Allemagne)

(72) Inventeur(s):

GORVAL Evgeni – Allemagne, KEIL Bernd – Allemagne,
BAGGA Karan – Australie

(74) Mandataire(s):

THYSSENKRUPP INTELLECTUAL PROPERTY GMBH –
45143 Essen (Allemagne)

(54) Vorrichtung und Verfahren zur Synthese von grünem Ammoniak .

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Synthese von Ammoniak umfassend: – Bereitstellen von Wasserstoff; – Zuführen des Wasserstoffs zu einem Ammoniaksynthesekreislauf (10), umfassend einen Ammoniakkonverter (3), in welchem Ammoniak katalytisch synthetisiert wird; einen Zirkulator (1), welcher dem Ammoniakkonverter (3) ein den Wasserstoff und Stickstoff enthaltendes Edukt-Gasmisch zuführt; und eine Kühlstrecke (5), in welcher Ammoniak aus einem Produkt-Gasmisch des Ammoniakkonverters (3) auskondensiert wird; wobei der Ammoniaksynthesekreislauf (10) zunächst in einem Vollastbetrieb betrieben wird, in welchem dem Ammoniaksynthesekreislauf (10) eine Nenn-Durchflussmenge des Wasserstoffs bereitgestellt wird, und wobei der Ammoniaksynthesekreislauf (10) von dem Vollastbetrieb in einen Teillastbetrieb überführt wird, in welchem dem Ammoniaksynthesekreislauf (10) eine Durchflussmenge an Wasserstoff bereitgestellt wird, die geringer ist als die Nenn-Durchflussmenge, wobei in dem Teillastbetrieb ein erster Gasstrom von dem Edukt-Gasmisch abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird und ein zweiter Gasstrom aus dem Produkt-Gasmisch abgezweigt wird und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird.

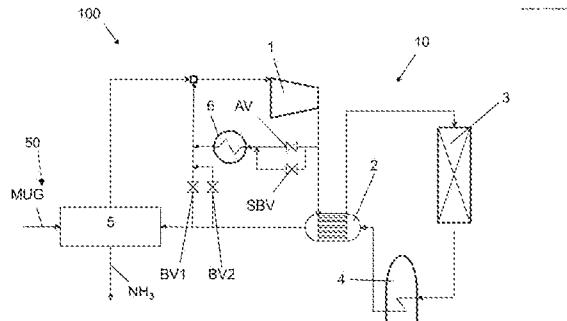


Fig. 1

Vorrichtung und Verfahren zur Synthese von grünem Ammoniak

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Synthese von Ammoniak, wobei Wasserstoff bereitgestellt und einer Ammoniaksynthese-Kreislauf zugeführt wird, welche umfasst: einen Ammoniakkonverter, in welchem Ammoniak katalytisch synthetisiert wird; einen Zirkulator, welcher dem Ammoniakkonverter ein den Wasserstoff und Stickstoff enthaltendes Edukt-Gasmisch zuführt; und eine Kühlstrecke, in welcher Ammoniak aus einem Produkt-Gasmisch des Ammoniakkonverters auskondensiert wird. Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Synthese von Ammoniak, umfassend: eine Zuführeinrichtung zum Bereitstellen von Wasserstoff; einen Ammoniaksynthese-Kreislauf mit einem Ammoniakkonverter zur katalytischen Synthese von Ammoniak, einem Zirkulator zum Zuführen eines Wasserstoff und Stickstoff enthaltenden Edukt-Gasmischs zu dem Ammoniakkonverter und einer Kühlstrecke zum Auskondensieren von Ammoniak aus einem Produkt-Gasmisch des Ammoniakkonverters.

[0001] Bei der herkömmlichen Synthese von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff gemäß dem Haber-Bosch Verfahren wird der Wasserstoff häufig durch Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen gewonnen. Die Kohlenwasserstoffe können sicher und für längere Zeiträume zwischengelagert werden, so dass sie zu jeder Zeit in ausreichender Menge zur Verfügung gestellt werden können. Daher kann auch zu jeder Zeit daraus durch Dampfreformierung eine ausreichende Menge an Wasserstoff gewonnen werden. Dies ermöglicht eine herkömmliche Synthese von Ammoniak über längere Zeiträume bei maximaler Auslastung der Syntheseanlage unter kontinuierlicher Verfahrensführung (Volllastbetrieb). Auch eine variable Auslastung der Syntheseanlage unter kontinuierlicher Verfahrensführung ist möglich. So kann der Durchsatz vorübergehend vermindert werden (Teillastbetrieb), ohne dass es zu einer vollständigen Unterbrechung der Verfahrensführung kommt. Unterbrechungen der Synthese sind meist nur nach längeren Zeiträumen der Synthese, häufig erst nach Monaten oder sogar Jahren erforderlich, z.B. für Wartungsarbeiten.

[0002] Infolge der allgemeinen Bestrebungen, den Einsatz fossiler Energieträger zu reduzieren oder vollständig zu vermeiden, wurden alternative Verfahren zur Synthese von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff gemäß dem Haber-Bosch Verfahren entwickelt, bei denen der Wasserstoff nicht durch Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen, sondern durch Elektrolyse von Wasser gewonnen wird. Der für die Elektrolyse eingesetzte elektrische Strom wird dabei aus erneuerbarer Energie gewonnen, insbesondere aus Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie oder Kombinationen davon. Der so gewonnene Wasserstoff wird als „grüner Wasserstoff“ bezeichnet.

[0003] Erneuerbare Energie ist nicht kontinuierlich in konstanter Menge verfügbar. Insbesondere die LU103200 Verfügbarkeit von Windkraft und Solarenergie ist erheblichen Schwankungen unterworfen, welche insbesondere vom Wetter und vom Tag-Nacht-Zyklus verursacht werden. Mit den Schwankungen der Verfügbarkeit erneuerbarer Energie schwankt auch die Verfügbarkeit von aus der erneuerbaren Energie gewonnenem elektrischem Strom. Für die Elektrolyse von Wasser sind solche Schwankungen ein untergeordnetes Problem, denn die Leistung moderner Elektrolysezellen kann zeitnah solchen Schwankungen angepasst werden. Im Ergebnis schwankt damit die Verfügbarkeit von Wasserstoff, welcher durch Elektrolyse von Wasser mit elektrischem Strom aus erneuerbarer Energie gewonnen wird, zeitgleich (oder geringfügig zeitlich versetzt) mit der Schwankung der Verfügbarkeit der erneuerbaren Energie.

[0004] Anlagen zur Synthese von Ammoniak aus Wasserstoff und Stickstoff nach dem Haber-Bosch Verfahren sind vergleichsweise träge und können kurzfristige Schwankungen der Verfügbarkeit von Wasserstoff nicht oder nur zu einem geringen Teil ausgleichen.

[0005] Um zu jeder Zeit eine ausreichende Menge an Wasserstoff zur Verfügung stellen zu können, damit die Anlagen kontinuierlich betrieben werden können, wäre das Zwischenspeichern der erneuerbaren Energie, des daraus erzeugten elektrischen Stroms, oder des damit durch Elektrolyse von Wasser gewonnenen Wasserstoffs erforderlich. In Zeiten geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energie könnte dann auf den jeweiligen Zwischenspeicher zugegriffen werden. Die Größe des Zwischenspeichers müsste ausreichen, um übliche Zeitspannen geringer Verfügbarkeit erneuerbarer Energie zu überbrücken, d.h. ggf. mehrere Tage.

[0006] Beim Betrieb von Anlagen zur Synthese von Ammoniak mit grünem Wasserstoff ist es wünschenswert, einen Teillastbetrieb bis zu einer Reduktion auf 10% der Volllast zu ermöglichen, um die Speicherkapazität für grünen Wasserstoff bzw. für die aus erneuerbaren Quellen erzeugte Energie zu minimieren bzw. die Anlagen nicht jedes Mal abschalten zu müssen, wenn die zur Verfügung stehende Leistung an erneuerbarer Energie gering ist. Das Wiederanfahren der Anlage aus dem kalten Zustand ist mit einem hohen Zeitaufwand und dem damit verbundenen Produktionsausfall verbunden. Die besondere Herausforderung bei diesem flexiblen Betrieb in „grünen“ Anlagen (diese Herausforderung fehlt bei den konventionellen Anlagen) besteht darin, den Synthesedruck (meist 140-200 bar) in einem engen Bereich konstant zu halten. Während die Druckänderung in den konventionellen Anlagen unproblematisch ist (weil selten), würde sie in den grünen Anlagen mit ihren häufigen Lastwechseln zu einer inakzeptablen Belastung der Anlagen, insbesondere des Ammoniakkonverters, führen. Der Konverter müsste dann für wechselnde Belastungen ausgelegt werden, was zu höheren Anlagenkosten führt.

[0007] Darauf hinaus gibt es weitere Herausforderungen, die die Regelung grüner Anlagen zur Synthese von Ammoniak erschweren: So sollte der Volumenstrom in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf hoch genug sein, um eine gleichmäßige Strömungsverteilung in den Katalysatorbetten zu gewährleisten. Ansonsten besteht die Gefahr, dass sich im Ammoniakkonverter heiße bzw. kalte Strähnen bilden, die

im schlimmsten Fall den Katalysator beschädigen oder zum Erlöschen der Synthesereaktion führen. So LU103200 ist beispielsweise das in der EP 3 819 261 A1 vorgeschlagene Regelungskonzept für den Betrieb grüner Anlagen zu Ammoniaksynthese problematisch. Bei diesem Regelungskonzept wird der Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf durch Öffnen des *AntiSurge*-Ventils des Rückführkompressors konstant gehalten. Dadurch wird der Volumenstrom in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf etwa proportional zur sinkenden Wasserstoffverfügbarkeit reduziert, was bei einer Teillast von unter 50 % zu einer ungleichmäßigen Gasverteilung in den Katalysatorbetten des Ammoniakkonverters führen kann.

[0008] Vor diesem Hintergrund ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen flexiblen und sicheren Betrieb einer grünen Ammoniakanlage bei schwankender Verfügbarkeit von Wasserstoff zu ermöglichen.

[0009] Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand der Patentansprüche gelöst.

[0010] Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zur Synthese von Ammoniak umfassend:

- Bereitstellen von Wasserstoff;
- Zuführen des Wasserstoffes zu einem Ammoniaksynthese-Kreislauf, umfassend
 - einen Ammoniakkonverter, in welchem Ammoniak katalytisch synthetisiert wird;
 - einen Zirkulator, welcher dem Ammoniakkonverter ein den Wasserstoff und Stickstoff enthaltendes Edukt-Gasgemisch zuführt; und
 - eine Kühlstrecke, in welcher Ammoniak aus einem Produkt-Gasgemisch des Ammoniakkonverters auskondensiert wird;

wobei der Ammoniaksynthese-Kreislauf zunächst in einem Vollastbetrieb betrieben wird, in welchem dem Ammoniaksynthese-Kreislauf eine Nenn-Durchflussmenge des Wasserstoffes bereitgestellt wird, und

wobei der Ammoniaksynthese-Kreislauf von dem Vollastbetrieb in einen Teillastbetrieb wechselt, in welchem dem Ammoniaksynthese-Kreislauf eine Durchflussmenge an Wasserstoff bereitgestellt wird, die geringer ist als die Nenn-Durchflussmenge,

wobei in dem Teillastbetrieb ein erster Gasstrom von dem Edukt-Gasgemisch abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird und ein zweiter Gasstrom aus dem Produkt-Gasgemisch abgezweigt wird und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird.

[0011] Im Verlauf des erfindungsgemäßen Verfahrens ändert sich die momentane Verfügbarkeit des Wasserstoffs, beispielsweise durch äußere Einflüsse wie z.B. Tag-Nacht-Zyklus, Wetter, etc. Zunächst ist die momentane Verfügbarkeit des Wasserstoffs hoch, so dass der Ammoniaksynthese-Kreislauf im Vollastbetrieb betrieben wird. Während eines darauffolgenden Zeitintervalls ist die Verfügbarkeit des Wasserstoffs reduziert und der Ammoniaksynthese-Kreislauf wird in einem Teillastbetrieb betrieben. Gemäß der Erfindung ist vorgesehen, dass in dem Teillastbetrieb der erste Gasstrom von dem Edukt-Gasgemisch, beispielsweise am Ausgang des Zirkulators, zu dem Eingang des Zirkulators geleitet wird

und der zweite Gasstrom von dem Produkt-Gasgemisch, beispielsweise am Eingang der Kühlstrecke, LU103200 abgezweigt und ebenfalls zum Eingang des Zirkulators geleitet wird.

[0012] Der erste Gasstrom reduziert zwar den Volumenstrom des Edukt-Gasgemischs, trägt aber dazu bei, dass der Druck am Eingang des Ammoniakkonverters im Wesentlichen konstant gehalten werden kann. Der zweite Gasstrom überbrückt die Kühlstrecke, verhindert das Auskondensieren des Ammoniaks und führt daher zu einer Erhöhung der Ammoniakkonzentration in dem Edukt-Gasgemisch. Hierdurch kann der Volumenstrom des Edukt-Gasgemischs in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf bei reduzierter Verfügbarkeit von Wasserstoff, insbesondere bei einer Reduktion unterhalb von 50% der Nennlast, aufrechterhalten werden. Etwaige negative Auswirkungen eines zu geringen Volumenstroms in dem Ammoniakkonverter können auf diese Weise verhindert werden. Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht eine Regelung der Synthese von Ammoniak bis zu sehr kleinen Teillasten, ohne dass die Gefahr einer ungleichmäßigen Durchströmung der Katalysatorbetten besteht. Große Laständerungen können ohne unannehmbar hohe Druckschwankungen und extremen *Turndown* in der Kälteanlage geregelt werden, ohne dass zusätzliche Hardware erforderlich ist. Insofern kann ein flexibler und sicherer Betrieb einer grünen Ammoniakanlage mit Schwankungen der Verfügbarkeit von Wasserstoff ermöglicht werden.

[0013] Bevorzugt ist der Zirkulator als Kompressor ausgebildet.

[0014] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass ein Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf gemessen wird, insbesondere der Druck des dem Ammoniakkonverter zugeführten Edukt-Gasgemischs. Die Messung des Drucks ermöglicht eine Regelung des Drucks in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf. Zur Messung des Drucks kann der Ammoniaksynthese-Kreislauf, insbesondere eine Gasleitung des Ammoniaksynthese-Kreislaufs, einen Gasdrucksensor aufweisen.

[0015] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass der erste Gasstrom in Abhängigkeit von einem Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf, insbesondere dem Druck des dem Ammoniakkonverter zugeführten Edukt-Gasgemischs, eingestellt wird. Beispielsweise kann bei sinkendem Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf der Volumenstrom des ersten Gasstroms erhöht werden, um den Volumenstrom des Edukt-Gasgemischs zum Ammoniakkonverter zu reduzieren. Durch diese Maßnahmen kann der Druck des Edukt-Gasgemischs gestützt werden. Insofern ist es möglich, den Druck des Edukt-Gasgemischs im Wesentlichen konstant zu halten. Bevorzugt wird der erste Gasstrom derart eingestellt, dass der Volumenstrom des Edukt-Gasgemischs stets größer oder gleich 50% des Nenn-Volumenstroms bei Vollast ist, so dass negative Auswirkungen eines zu geringen Volumenstroms in dem Ammoniakkonverter jedenfalls vermieden werden.

[0016] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass – alternativ oder zusätzlich zu dem ersten Gasstrom – der zweite Gasstrom in Abhängigkeit von einem Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf, insbesondere dem Druck des dem Ammoniakkonverter zugeführten

Edukt-Gasmischs, eingestellt wird. Beispielsweise kann bei sinkendem Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf der Volumenstrom des zweiten Gasstroms erhöht werden, um die Konzentration von Ammoniak im Edukt-Gasmisch zu erhöhen. Ein vorübergehender Mangel von Wasserstoff im Edukt-Gasmisch kann durch die erhöhte Ammoniak-Konzentration kompensiert werden, um einen ausreichend hohen Volumenstrom des Edukt-Gasmischs, und damit einen ausreichend hohen Volumenstrom im Ammoniakkonverter, auch bei reduzierter Verfügbarkeit von Wasserstoff aufrechtzuerhalten. Durch die erhöhte Ammoniakkonzentration am Eintritt des Ammoniakkonverters wird weniger Ammoniak pro Durchtritt des Konverters gebildet, so dass der Umsatz im Ammoniakkonverter an die verminderte Wasserstoffzufuhr angepasst wird.

[0017] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass der zweite Gasstrom in Abhängigkeit von einer Ammoniakkonzentration in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf eingestellt wird. Bevorzugt wird bei einem Absinken des Drucks in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf ein Sollwert der Ammoniakkonzentration in dem Edukt-Gasmisch erhöht. Durch den zweiten Gasstrom kann die Konzentration an Ammoniak in dem Edukt-Gasmisch verändert werden. Beispielsweise kann ein größerer Volumenstrom des zweiten Gasstroms zu einer höheren Konzentration von Ammoniak im Edukt-Gasmisch führen und ein kleinerer Volumenstrom des zweiten Gasstroms zu einer geringeren Konzentration von Ammoniak im Edukt-Gasmisch.

[0018] Gemäß einer konstruktiv vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass der erste Gasstrom mittels eines ersten steuerbaren Ventils abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird. Bevorzugt ist das erste Ventil derart ausgelegt, dass es 50% oder mehr des Nenn-Volumenstroms des Edukt-Gasmischs führen kann.

[0019] Gemäß einer konstruktiv vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass der zweite Gasstrom mittels mindestens eines zweiten steuerbaren Ventils abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird.

[0020] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass der zweite Gasstrom mittels mehrerer zweiter steuerbarer Ventile (sogenannter Bypass-Ventile) abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird, wobei ein erstes der zweiten Ventile einen kleineren Durchflusskoeffizienten als ein zweites der zweiten Ventile aufweist, und wobei zunächst nur das erste der zweiten Ventile geöffnet wird, und dann das zweite der zweiten Ventile geöffnet wird. Die zweiten Ventile sind bevorzugt parallel zueinander angeordnet. Durch das Vorsehen mehrerer zweiter Ventile, die nicht gleichzeitig, sondern nacheinander geöffnet bzw. geschlossen werden, kann der Volumenstrom des zweiten Gasstroms mit zeitlich aufeinanderfolgenden unterschiedlichen Änderungsraten eingestellt werden. Bevorzugt sind zwei zweite Ventile (also zwei Bypass-Ventile) vorgesehen.

[0021] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass das zweite der zweiten Ventile erst dann geöffnet wird, wenn erste der zweiten Ventile vollständig geöffnet ist. Das erste der zweiten Ventile kann vergleichsweise schnell schalten und dadurch eine schnelle Reaktion auf

Änderungen der Wasserstoffverfügbarkeit ermöglichen. Das zweite der zweiten Ventile kann dann bei LU103200 vollständig geöffnetem erstem Ventil eine zusätzliche Vergrößerung des Volumenstroms des zweiten Gasstroms ermöglichen.

[0022] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass das zweite der zweiten Ventile erst dann geöffnet wird, wenn das erste Ventil vollständig geöffnet ist.

[0023] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass der Wasserstoff mittels Elektrolyse hergestellt wird, die mit elektrischem Strom aus regenerativer Energie betrieben wird. Bevorzugt wird der elektrische Strom aus Wasserkraft gewonnen; bevorzugt hängt dabei die momentan verfügbare Menge an Wasserstoff von der momentanen Verfügbarkeit von Wasserkraft ab. Alternativ oder zusätzlich bevorzugt ist es, wenn der elektrische Strom aus Solarenergie gewonnen wird; bevorzugt hängt dabei die momentan verfügbare Menge an Wasserstoff von der momentanen Verfügbarkeit von Solarenergie ab. Weiter alternativ oder zusätzlich bevorzugt ist es, wenn der elektrische Strom aus Windkraft gewonnen wird; bevorzugt hängt dabei die momentan verfügbare Menge an Wasserstoff von der momentanen Verfügbarkeit von Windkraft ab.

[0024] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Zirkulators ein *AntiSurge*-Ventil angeordnet ist. Das Anti-Surge-Ventil kann einen weiteren Gasstrom parallel zu dem ersten Gasstrom ermöglichen, wenn der Druck im Ammoniakkonverter zu groß wird oder der Volumenstrom auf der Saugseite des Zirkulators zu gering ist. Bevorzugt ist das *AntiSurge*-Ventil derart ausgelegt, dass es 100% des Nenn-Volumenstroms des Edukt-Gasgemischs führen kann.

[0025] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird eine Vorrichtung zur Synthese von Ammoniak beschrieben, umfassend:

- eine Zuführeinrichtung zum Bereitstellen von Wasserstoff;
- einen Ammoniaksynthese-Kreislauf umfassend

einen Ammoniakkonverter zur katalytischen Synthese von Ammoniak;

einen Zirkulator zum Zuführen eines Wasserstoff und Stickstoff enthaltenden Edukt-Gasgemischs zu dem Ammoniakkonverter; und

eine Kühlstrecke zum Auskondensieren von Ammoniak aus einem Produkt-Gasgemisch des Ammoniakkonverters;

wobei der Ammoniaksynthese-Kreislauf dazu konfiguriert ist, in einem Vollastbetrieb betrieben zu werden, in welchem dem Ammoniaksynthese-Kreislauf eine Nenn-Durchflussmenge des Wasserstoffes bereitgestellt wird, und

wobei der Ammoniaksynthese-Kreislauf dazu konfiguriert ist, in einem Teillastbetrieb betrieben zu werden, in welchem dem Ammoniaksynthese-Kreislauf eine Durchflussmenge an Wasserstoff bereitgestellt wird, die geringer ist als die Nenn-Durchflussmenge,

wobei in dem Teillastbetrieb ein erster Gasstrom von dem Edukt-Gasgemisch abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird und ein zweiter Gasstrom aus dem Produkt-Gasgemisch abgezweigt wird und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird. LU103200

[0026] Bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung können dieselben Vorteile und technischen Wirkungen erreicht werden, wie sie bereits im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Synthese von Ammoniak beschrieben worden sind.

[0027] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass die Vorrichtung einen Druckregler umfasst, der dazu konfiguriert ist, einen Volumenstrom des ersten Gasstroms einzustellen, um den Druck des Edukt-Gasgemischs auf einen vorgegebenen Sollwert zu regeln. Bevorzugt ist der Druckregler dazu eingerichtet einen Druck-Istwert des Edukt-Gasgemischs zu empfangen. Zur Messung des Druck-Istwerts ist bevorzugt ein Drucksensor als Teil des Ammoniaksynthese-Kreislaufs vorgesehen. Der Druckregler ist bevorzugt dazu konfiguriert, ein erstes Ventil anzusteuern, welches zwischen dem Ausgang, also der Druckseite, des Zirkulators und dem Eingang, also der Saugseite, des Zirkulators angeordnet ist. Bevorzugt kann der Druckregler mittels des ersten Ventils den ersten Gasstrom einstellen, welcher von dem Edukt-Gasgemisch abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird.

[0028] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass der Druckregler zusätzlich dazu konfiguriert ist einen Volumenstrom des zweiten Gasstroms einzustellen (sogenannte „Split-Range-Regelung“), um den Druck des Edukt-Gasgemischs auf einen vorgegebenen Sollwert zu regeln. Der Druckregler ist bevorzugt dazu konfiguriert, ein oder mehrere zweite Ventile anzusteuern, welche zwischen dem Ausgang des Ammoniakkonverters und dem Eingang, also der Saugseite, des Zirkulators, angeordnet sind. Bevorzugt kann der Druckregler mittels des ersten oder des zweiten der zweiten Ventile den zweiten Gasstrom einstellen, welcher von dem Produkt-Gasgemisch abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird.

[0029] Gemäß einer alternativen, vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung ist vorgesehen, dass die Vorrichtung einen Konzentrationsregler umfasst, der dazu konfiguriert ist, einen Volumenstrom des zweiten Gasstroms einzustellen, um eine Konzentration von Ammoniak in dem Edukt-Gasgemisch auf einen vorgegebenen Sollwert zu regeln. Der Konzentrationsregler ist bevorzugt dazu konfiguriert, ein oder mehrere zweite Ventile anzusteuern, welche zwischen dem Ausgang des Ammoniakkonverters und dem Eingang, also der Saugseite, des Zirkulators, angeordnet sind. Bevorzugt kann der Konzentrationsregler mittels des oder der zweiten Ventile den zweiten Gasstrom einstellen, welcher von dem Produkt-Gasgemisch abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators geleitet wird.

[0030] Alternativ oder zusätzlich zu den vorstehend erläuterten vorteilhaften Ausgestaltungen der Vorrichtung können auch die vorteilhaften Merkmale und Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens, allein oder in Kombination, bei der Vorrichtung zur Synthese von Ammoniak Anwendung finden.

[0031] Weitere Einzelheiten, Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den Zeichnungen, LU103200 sowie aus der nachfolgenden Beschreibung von bevorzugten Ausführungsformen anhand der Zeichnungen. Die Zeichnungen illustrieren dabei lediglich beispielhafte Ausführungsformen der Erfindung, welche den Erfindungsgedanken nicht einschränken.

[0032] Kurze Beschreibung der Figuren

[0033] Die Fig. 1 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Synthese von Ammoniak;

[0034] Die Fig. 2 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Synthese von Ammoniak mit einem Druckregler;

[0035] Die Fig. 3 zeigt beispielhafte Ventilöffnungsgrade für verschiedene Lastzustände.

[0036] Die Fig. 4 zeigt beispielhafte Last- und Druckverläufe.

[0037] Die Fig. 5 zeigt beispielhafte Temperaturverläufe.

[0038] Die Fig. 6 zeigt einen beispielhaften Volumenstromverlauf.

[0039] Die Fig. 7 zeigt einen beispielhaften Ammoniakkonzentrationsverlauf.

[0040] Die Fig. 8 zeigt beispielhafte Druckoszillationen.

[0041] Die Fig. 9 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Synthese von Ammoniak mit einem Druckregler und einem Konzentrationsregler.

[0042] Die Fig. 10 zeigt beispielhafte Druckverläufe.

[0043] Die Fig. 11 zeigt beispielhafte Volumenstromverläufe.

[0044] Ausführungsformen der Erfindung

[0045] In **Fig. 1** ist ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung 100 zur Synthese von Ammoniak dargestellt. Die Vorrichtung 100 umfasst eine Zuführeinrichtung 50 zum Bereitstellen von Wasserstoff sowie einen Ammoniaksynthese-Kreislauf 10. Der Wasserstoff wird als Teil eines Einsatzgases MUG bereitgestellt und einer Kühlstrecke 5 des Ammoniaksynthese-Kreislaufs 10 zugeführt. In der Kühlstrecke 5 wird aus einem Produkt-Gasgemisch des Ammoniaksynthese-Kreislaufs 10 Ammoniak auskondensiert. Das verbleibende Gasgemisch wird im Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 geführt, und mit dem Einsatzgas zusammengeführt und einem als Kompressor ausgebildeten Zirkulator 1 dem Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 zugeleitet.

[0046] Der Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 umfasst ferner einen auf der Druckseite des Zirkulators 1 angeordneten Gas-Gas-Wärmetauscher 2 zum Vorwärmen eines auf der Druckseite des Zirkulators 1 vorliegenden Edukt-Gasgemisches. Das vorgewärmte Edukt-Gasgemisch wird einem Ammoniakkonverter 3 des Ammoniaksynthese-Kreislaufs 10 zugeführt, in welchem eine katalytische Synthese von Ammoniak aus im Edukt-Gasgemisch enthaltenen Wasserstoff und Stickstoff an einem geeigneten Katalysator erfolgt. Parallel zu dem Zirkulator 1 ist ein *AntiSurge*-Ventil AV angeordnet, welches in Reihe mit

einem Kühler 6 geschaltet ist. Über das *AntiSurge*-Ventil AV kann ein Strom direkt zur Saugseite des LU103200 Zirkulators 10 zurückgeführt werden, wenn der Mindestförderstrom unterschritten wird und der Zirkulator 10 droht in den Zustand des sogenannten „Surgens“ zu fallen.

[0047] Der Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 wird idealerweise in einem Vollastbetrieb betrieben, in welchem dem Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 eine Nenn-Durchflussmenge des Wasserstoffes bereitgestellt wird. Wird der Wasserstoff mittels Elektrolyse hergestellt, die mit elektrischem Strom aus regenerativer Energie betrieben wird, so kommt es aufgrund der schwankenden Verfügbarkeit von regenerativen Energien zu Schwankungen in der Verfügbarkeit von Wasserstoff. Sinkt der Volumenstrom an Wasserstoff unter einen Nenn-Volumenstrom, so wird der Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 in einen Teillastbetrieb versetzt, in welchem dem Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 eine Durchflussmenge an Wasserstoff bereitgestellt wird, die geringer ist als die Nenn-Durchflussmenge. Ausführungsbeispiele eines erfindungsgemäßen Teillastbetriebs sollen nachfolgend anhand der Darstellungen in Fig. 2 und 3 erläutert werden. Dabei kommt ein erstes Ventil SBV zur Verwendung, welches die Druckseite und die Saugseite des Zirkulators 1 miteinander verbindet, um einen ersten Gasstrom von dem Edukt-Gasgemisch abzuzweigen und zum Eingang des Zirkulators 1 zu leiten. Ferner finden zwei zweite Ventile BV1, BV2 Verwendung, welche parallel zueinander zwischen dem Eingang und dem Ausgang der Kühlstrecke 5 angeordnet sind, um wahlweise einen zweiten Gasstrom aus dem Produkt-Gasgemisch abzuzweigen und zum Eingang des Zirkulators 1 zu leiten. Erfindungsgemäß werden der erste und der zweite Gasstrom bereitgestellt, um einen Teillastbetrieb zu ermöglichen, so dass der Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 bei Schwankungen der Wasserstoffverfügbarkeit flexibel und sicher betrieben werden kann.

[0048] **Fig. 2** zeigt ein Ausführungsbeispiel mit einem Druckregler PIC zum Regeln des Drucks des Edukt-Gasgemisches und einem Konzentrationsregler AIC zum Regeln der Ammoniakkonzentration im Edukt-Gasgemisch. Hierbei wird der Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 gemessen, insbesondere der Druck des dem Ammoniakkonverter 3 zugeführten Edukt-Gasgemisches. Ferner wird die Ammoniakkonzentration in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 gemessen, insbesondere in dem Edukt-Gasgemisch. Der erste Gasstrom wird dann in Abhängigkeit von dem gemessenen Druck eingestellt. Der zweite Gasstrom wird in Abhängigkeit von der gemessenen Ammoniakkonzentration eingestellt wird. Hier kommt der Wert für die einzustellende Ammoniakkonzentration vom Druckregler PIC.

[0049] Bei dem Verfahren wird anhand der Kombination aus dem Rücklauf des Zirkulators 1 (erster Gasstrom) und dem *Bypass* der Kühlstrecke (zweiter Gasstrom) sichergestellt, dass drei Schlüsselkriterien erfüllt werden: (a) Stabiler Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf 10; (b) Rückführung eines Volumenstroms von mehr als 50 % des Auslegungswerts zur Vermeidung von Synthesegasfehlverteilungen im Ammoniakkonverter 3, selbst bei einem *Turndown* von 10 % (Teillastbetrieb mit einem Wasserstoff-Volumenstrom von 10% des Nenn-Volumenstroms); (c) Temperatur des Katalysatorbetts des Ammoniakkonverters 3 liegt innerhalb eines zulässigen Bereichs für den gesamten Betriebsbereich (10-100 %).

[0050] Der zweite Gasstrom, d.h. der *Bypass*-Strom um die Kühlstrecke 5 wird von zwei *Bypass*-Ventilen BV1, BV2 übernommen. Ein erstes *Bypass*-Ventil BV1 weist einen einem kleineren Durchflusskoeffizienten Cv-Wert (=kleinerer Durchfluss) auf und ein zweites *Bypass*-Ventil BV2 weist einen größeren Cv-Wert (=größerer Durchfluss) auf. Die Aufteilung der beiden Ventile BV1 und BV2 in Bezug auf die einzustellende Laständerung erfolgt wie folgt: Das erste *Bypass*-Ventil BV1 übernimmt 0 bis 50% des Ausgangswertes des Konzentrationsreglers AIC, das zweite *Bypass*-Ventil BV2 übernimmt 50% bis 100% des Ausgangswertes des Konzentrationsreglers AIC. Das erste *Bypass*-Ventil BV1 ist für eine schnelle Reaktion auf eine Laständerung oder eine Feinabstimmung nach den ersten großen Schritten gedacht und wird sehr schnell geöffnet oder geschlossen.

[0051] Mit dem ersten, auch als Spill Back Ventil bezeichneten, Ventil SBV am Zirkulator 1 wird der Volumenstrom des ersten Gasstroms so geregelt, dass der Druck am Eingang des Ammoniakkonverters 3 konstant bleibt. Das parallel zu dem ersten Ventil SBV vorgesehene Anti-Surge-Ventil AV wird aus Gründen des Maschinenschutzes vorgehalten und verhindert einen zu kleinen Volumenstrom auf der Saugseite des Zirkulators 1 als Teil einer unabhängigen Anti-Surge-Regelung für den Zirkulator 1.

[0052] Wenn sich die Last verringert, d.h. wenn die Verfügbarkeit des Wasserstoffs abnimmt, wechselt der Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 von einem Vollastbetrieb in den Teillastbetrieb, wobei folgende Schritte ablaufen:

[0053] Der Ausgang des Druckreglers PIC steigt, d.h. die Differenz zwischen einem vorgegebenen Sollwert und dem Istwert wird größer.

[0054] Zunächst wird das erste Ventil SBV geöffnet, um den Volumenstrom zum Ammoniakkonverter 3 zu reduzieren. Bei einem Teillastbestrieb von größer als 50% der Volllast reicht es aus, nur das erste Ventil SBV zu öffnen, um den Druck des Edukt-Gasstroms aufrechtzuerhalten. Der durch das Öffnen des ersten Ventils SBV allein erreichbare minimale Teillastbetrieb liegt bei etwa 50 %, so dass der Volumenstrom durch den Ammoniakkonverter 3 bei > 50 % gehalten wird. Der Ausgangswert des Druckreglers PIC liegt in diesem Betriebsbereich bei 0 bis 50%.

[0055] Sobald der Volumenstrom des Wasserstoffs weiter sinkt und ein noch weiter abgesenkter Teillastbetrieb erforderlich ist, erhöht sich der Ausgang des Druckreglers PIC auf über 50 % und es geschieht Folgendes: Der Ausgang des Druckreglers PIC liefert einen Fernsollwert für den Ammoniakkonzentrationsregler AIC. Eine Erhöhung des Ausgangs des Druckreglers PIC erhöht den Konzentrations-Sollwert für den AIC. Das Ausgangssignal des Konzentrationsreglers AIC wird auf das erste *Bypass*-Ventil BV1 (0-50%) und das zweite *Bypass*-Ventil BV2 (50-100%) aufgeteilt. Das zweite *Bypass*-Ventil BV2 nur, wenn das erste *Bypass*-Ventil BV1 und das erste Ventil SBV vollständig geöffnet sind. Der Druckregler PIC ändert die Sollwerte für den Schleifendruck, der direkt vom ersten Ventil SBV eingestellt wird und für die Ammoniakkonzentration, die von den zwei (zweiten) *Bypass*-Ventilen BV1 und BV2 entsprechend der Abweichung vom Solldruck eingestellt wird.

[0056] Alternativ zur dieser Art der Regelung kann der Druckregler PIC einem Regler des An- saugstroms des Zirkulators 1 einen entfernten Sollwert zur Verfügung stellen, der dann das erste Ventil SBV ansteuert.

[0057] **Fig. 3** zeigt ein Beispiel für Ventilöffnungsgrade bei verschiedenen Lastzuständen. Es sind folgende Aspekte erkennbar:

[0058] Wenn das erste *Bypass*-Ventil BV1 geschlossen ist, dann ist auch das zweite *Bypass*-Ventil BV2 geschlossen.

[0059] Wenn das zweite *Bypass*-Ventil BV2 geöffnet ist, sind das erste Ventil SBV und das erste *Bypass*-Ventil BV1 bereits vollständig geöffnet.

[0060] Wenn die Last erhöht wird, wird zuerst das zweite *Bypass*-Ventil BV2 geschlossen. Erst nachdem das zweite *Bypass*-Ventil BV2 geschlossen ist, wird die Öffnung der anderen beiden Ventile reduziert: Das erste Ventil SBV wird auf die vorgegebenen Sollwerte eingestellt und das erste *Bypass*-Ventil BV1 wird langsam geschlossen. Die gewünschten Sollwerte für das erste Ventil SBV nähern sich sehr schnell dem stabilen Zustand, spätestens dann ist das zweite *Bypass*-Ventil BV1 vollständig geschlossen.

[0061] Bei gleicher Belastung sind die Endlagen der Ventile BV1, BV2, SBV unabhängig von der vorherigen Teillast identisch.

[0062] Das erste Ventil SBV lässt selbst in der zu 100 % geöffneten Stellung nur einen Durchfluss von maximal 50 % (gemessen bei Normalbetrieb) zu. Das bedeutet, dass man immer noch das *AntiSurge*-Ventil AV benötigt, um im Falle eines blockierten Ammoniakkonverters 3 das gesamte Rückföhrgas zur Saugseite des Zirkulators 1 zu leiten. Das *AntiSurge*-Ventil AV muss also weitere 50% bewältigen.

[0063] Die folgende Tabelle verdeutlicht das Vorgehen bei verschiedenen TDR-Änderungen (Laständerungen). Die aufgeführten Grenzwerte sind nur als Beispiele zu betrachten.

TDR-Änderungen		Große Anzeige der Ventilstellung ("ganz offen", "ganz geschlossen", "Normalbetrieb", "in Regelung")
Von (%)	Zu (%)	
100	85	Nur das erste Ventil SBV ist geregelt, <i>AntiSurge</i> -Ventil, das erste <i>Bypass</i> -Ventil BV1 und das zweite <i>Bypass</i> -Ventil BV2 sind geschlossen. Das erste Ventil SBV ist bei 100 % (Auslegungsfall) vollständig geschlossen, beginnt aber zwischen 100 % und 85 % zu öffnen, um den Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 zu steuern.
85	60	Das erste Ventil SBV ist im Regelbetrieb und nähert sich der vollständig geöffneten Position, wenn die Last auf 60 % sinkt. Das erste <i>Bypass</i> -

		Ventil BV1 und das zweite <i>Bypass</i> -Ventil BV2 bleiben geschlossen. <i>AntiSurge</i> -Ventil AV und/oder das erste Ventil SBV sind/ist ab ca. 85% ohnehin immer offen	LU103200
60	30	Das erste Ventil SBV noch unter Kontrolle, aber bei 50 % voll geöffnet. Erstes <i>Bypass</i> -Ventil BV1 ist voll geöffnet, zweites <i>Bypass</i> -Ventil BV2 in Regelung. Recycle-Volumenstrom beträgt 50%.	
30	10	Das erste Ventil SBV ist voll geöffnet, das erste <i>Bypass</i> -Ventil BV1 ist voll geöffnet, das zweite <i>Bypass</i> -Ventil BV2 ist im Normalbetrieb. Recycle-Volumenstrom beträgt 50%.	
10	0	Alle Ventile SBV, BV1 und BV2 sind vollständig geöffnet. Der tatsächliche Volumenstrom des Recyclings beträgt 50%.	
0	10	Das zweite <i>Bypass</i> -Ventil BV2 ist teilweise geschlossen, das erste <i>Bypass</i> -Ventil BV1 wird erst geschlossen, wenn das zweite <i>Bypass</i> -Ventil BV2 vollständig geschlossen ist. Das erste Ventil SBV ist noch vollständig geöffnet.	
10	50	Das zweite <i>Bypass</i> -Ventil BV2 ist teilweise geschlossen, das erste <i>Bypass</i> -Ventil BV1 wird erst geschlossen, wenn das zweite <i>Bypass</i> -Ventil BV2 vollständig geschlossen ist. Das erste Ventil SBV ist vollständig geöffnet.	
50	80	Das zweite <i>Bypass</i> -Ventil BV2 ist geschlossen, das erste <i>Bypass</i> -Ventil BV1 ist noch nicht geschlossen. Das erste <i>Bypass</i> -Ventil und das erste Ventil SBV gehen gegen 100 % Anlagenlast in den Zustand "voll geschlossen" über.	

[0064] Die Übergangsregelung kann weiter fein abgestimmt werden, indem eine bewusste Überlappung in der *Splitrange*-Regelung eingeführt wird, z. B. 0 - 55 % für das erste Ventil SBV und 45 % - 100 % für die *Bypass*-Ventile BV1, BV2. Die Grenzen des Regelausgangs können auch entsprechend dem Durchflusskoeffizienten Cv-Wert der Ventile eingestellt werden, um die Verzögerung der Reaktion weiter zu verringern.

[0065] Dieses Regelungskonzept ermöglicht eine Druckregelung bis hinunter zu einer Absenkung von 10 % der Anlagenkapazität, ohne dass der Betrieb der Kühlstrecke 5 beeinträchtigt wird oder eine Anfahrheizung erforderlich ist. Darüber hinaus werden die Geräte und Rohrleitungen keinen zusätzlichen (pulsierenden) Belastungen ausgesetzt. **Fig. 4** zeigt die Drucksprünge während der TDR-Änderung von 100% auf 10% mit dem oben beschriebenen Regelschema.

[0066] Die Temperatur der Katalysatorbetten des Ammoniakkonverters 3 bleibt im gewünschten Bereich (350 - 500 °C), siehe **Fig. 5**.

[0067] Der Kreislaufdurchfluss bleibt selbst bei einer TDR von 10 % über 50 % (siehe **Fig. 6**) während LU103200 die Anfahrheizung erst bei 10 % TDR eingeschaltet wird (nicht dargestellt).

[0068] Die Einbeziehung der Ammoniakkonzentrationsmessung in die Regelung hat jedoch den Nachteil, dass die Ammoniakkonzentrationsmessung kein sofortiges Ergebnis liefert und bestenfalls mindestens etwa 2 Minuten dauert. Daher kann die Verwendung des Ammoniakgehalts als veränderliche Größe zu Problemen führen - dies wird durch **Fig. 8** bestätigt, in der deutlich Druckschwankungen zu sehen sind, die mit der Zeit sogar zunehmen, aber noch im zulässigen Bereich liegen.

[0069] Es ist zu beachten, dass die in **Fig. 8** gezeigten Schwingungen in der Regel auftreten, wenn das zweite *Bypass*-Ventil BV2 kaum geöffnet ist (< 20%), z.B. zwischen den Stunden 1 - 4 oder 12-16. Dies ist auf die Messverzögerung zurückzuführen, die dazu führt, dass sich das Ventil von offen nach geschlossen und umgekehrt bewegt. Da das zweite *Bypass*-Ventil BV2 ein großes Ventil ist, kann sein plötzliches Öffnen beim Empfang eines Ausgangssignals einen übermäßigen *Bypass*-Durchfluss verursachen, der wiederum ein oszillierendes Druckmuster auslöst. Wenn das zweite *Bypass*-Ventil BV2 immer weiter geöffnet wird, ist zu beobachten, dass sich die Druckschwankungen beruhigen. Es ist möglich, die Regelung zu dämpfen, um ein stabileres Verhalten zu erreichen.

[0070] Das größere Problem ist jedoch, dass diese Druckschwankungen wiederum Temperaturschwankungen im Konverter (+/-10 bis 15 °C) selbst bei gleichbleibenden Einsatzgas (MUG)-Zufuhrbedingungen verursachen, was letztlich zu einem vorzeitigen Katalysatorverschlechterung führen kann.

[0071] Diese Druckschwankungen können in Kauf genommen werden, aber es gibt auch mindestens zwei Möglichkeiten, sie zu beseitigen oder zu verringern. Erstens können sie durch eine schnellere Ammoniak-Analysemethode reduziert werden. Eine vollständige Beseitigung der Schwankungen kann jedoch mit dem folgenden Verfahren erreicht werden, das ebenfalls Teil dieser Erfindung ist: Statt exakte NH₃-Konzentrationen am Konvertereingang einzustellen (und zu messen!), wird der *Bypass*-Durchfluss auf zwei Arten vorgegeben: entweder über eine grobe *Look-up*-Tabelle für den jeweils zu betreibenden TDR oder über eine direkte Druckregelung. Die direkte Druckregelung bedeutet, dass die *Bypass*-Ventile BV1, BV2 direkt durch den Druckregler PIC des Ammoniaksynthese-Kreislaufs 10 geregelt werden, siehe **Fig. 9**.

Fig. 9 zeigt ein alternatives Ausführungsbeispiel, welches lediglich einen Druckregler PIC zum Regeln des Drucks des Edukt-Gasmischs umfasst.

[0072] Bei beiden Methoden wird also der Regelkreis von einem langsamen Konzentrationsregelkreis auf einen viel schnelleren Durchflussregelkreis umgestellt. Die endgültige Einstellung (so dass der Druck unverändert bleibt) wird mit dem ersten Ventil SBV vorgenommen. Die Werte für den *Bypass*-Durchfluss in der groben Nachschlagetabelle werden so festgelegt, dass die resultierende NH₃-Konzentration immer etwas zu hoch ist, so dass die Kreisgasmenge auch bei kleinster Belastung über 50% liegt und das erste Ventil SBV somit im Regeleingriff bleiben kann. Alternativ können die Öffnungen

der *Bypass*-Ventile BV1, BV2 und damit der *Bypass*-Durchfluss durch direkte Druckregelung manipuliert werden, ohne explizite Werte für Ammoniakkonzentration oder *Bypass*-Durchfluss. LU103200

[0073] Die Vorteile dieser Kontrollstrategie sind: Die Regelung bleibt bis zu sehr kleinen Teillasten möglich, ohne dass die Gefahr einer ungleichmäßigen Durchströmung der Katalysatorbetten besteht. Große Laständerungen können ohne unannehmbar hohe Druckschwankungen und extremen Turndown der Kühlstrecke 5 geregelt werden, ohne dass zusätzliche Hardware erforderlich ist. Durch geschickte Kombination der Stellungen der Ventile BV1, BV2 und SBV wird die Ammoniakkonzentration an jedem TDR gerade so hoch gehalten, dass das erste Ventil SBV in der Schnellregelung verbleibt und somit zur Feinregelung ("Trimmung") verwendet werden kann. Eine dynamische Simulation hat gezeigt, dass in den meisten analysierten Beispielszenarien eine Steigerung oder Verringerung der Anlagenlast von 2 %/min erreicht werden kann. In der weiteren Ausführung kommt der Sollwert der für einen bestimmten TDR einzustellenden *Bypass*-Durchflussrate aus einer Nachschlagetabelle oder den Öffnungen der *Bypass*-Ventile BV1, BV2 und damit die durch direkte Druckregelung zu manipulierende *Bypass*-Durchflussrate. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer Ammoniakmessung (mit dem Nachteil einer zweiminütigen Verzögerung) für die Regelung, wodurch Druckschwankungen vermieden werden.

[0074] In dem Konzept nach **Fig. 9** wird nur der Druck geregelt. Ausgehend von einem bestimmten Wasserstoff-Durchfluss und damit der MUG-Menge wird die Größe des *Bypass*-Durchflusses der groben *Look-up*-Tabelle entnommen, die dann durch Öffnen der *Bypass*-Ventile BV1, BV2 eingestellt wird. Danach wird nur noch der Druck am Konvertereingang mit Hilfe vom ersten Ventil SBV konstant gehalten. Die Anlage hat keine andere "Wahl", als das Wasserstoff/Stickstoff-Gemisch, das in den Ammoniaksynthese-Kreislauf 10 gelangt, vollständig in Ammoniak umzuwandeln. Die Anforderung "konstanter Druck" ist damit erfüllt. Die Aufgabe der Regelung einer TDR-Änderung reduziert sich somit auf eine schnelle und einfache - weil direkt wirkende - Druckregelung des Kreisgasflusses. Insgesamt kann mit diesem Konzept jede Teillaständerung schnell, sicher und ohne Überlastung einzelner Geräte angepasst werden.

[0075] Der Vergleich zwischen der Nachschlagetabelle und der direkten Druckregelung zeigt, dass die letztere vorteilhafter ist, obwohl die Druckspitze bei der direkten Druckregelung etwas höher ist (aber bequemerweise weit von den zulässigen 15 % entfernt, siehe **Fig. 10**). Die Hauptvorteile der direkten Druckregelung sind: eine einfachere und stabilere Kontrolle; keine Vorbereitung von Nachschlagetabellen erforderlich; geringere NH₃-Konzentrationen als bei der ausschließlichen Verwendung von Nachschlagetabellen.

[0076] Die Methode der direkten Druckregelung führt zu den gleichen Werten des Schleifendurchflusses wie die Methode mit NH₃-Messung, nur ohne Schleifendurchflussschwankungen, siehe **Fig. 11**.

Bezugszeichenliste

LU103200

- 1 Zirkulator
- 2 Gas-Gas-Wärmetauscher
- 3 Ammoniakkonverter
- 4 Dampferzeuger – Dampfüberhitzer
- 5 Kühlstrecke
- 6 Kühler
- 10 Ammoniaksynthese-Kreislauf
- 50 Zuführvorrichtung
- 100 Vorrichtung zur Synthese von Ammoniak

- AIC Konzentrationsregler
- AV *AntiSurge*-Ventil
- BV1 erstes *Bypass*-Ventil
- BV2 zweites *Bypass*-Ventil
- MUG Einsatzgas enthaltend Wasserstoff
- NH₃ Ammoniak
- PIC Druckregler
- SBV erstes Ventil

Patentansprüche:

LU103200

1. Ein Verfahren zur Synthese von Ammoniak umfassend:
 - Bereitstellen von Wasserstoff;
 - Zuführen des Wasserstoffes zu einem Ammoniaksynthese-Kreislauf (10), umfassend
 - einen Ammoniakkonverter (3), in welchem Ammoniak katalytisch synthetisiert wird;
 - einen Zirkulator (1), welcher dem Ammoniakkonverter (3) ein den Wasserstoff und Stickstoff enthaltendes Edukt-Gasgemisch zuführt; und
 - eine Kühlstrecke (5), in welcher Ammoniak aus einem Produkt-Gasgemisch des Ammoniakkonverters (3) auskondensiert wird;

wobei der Ammoniaksynthese-Kreislauf (10) zunächst in einem Vollastbetrieb betrieben wird, in welchem dem Ammoniaksynthese-Kreislauf (10) eine Nenn-Durchflussmenge des Wasserstoffes bereitgestellt wird, und

wobei der Ammoniaksynthese-Kreislauf (10) von dem Vollastbetrieb in einen Teillastbetrieb überführt wird, in welchem dem Ammoniaksynthese-Kreislauf (10) eine Durchflussmenge an Wasserstoff bereitgestellt wird, die geringer ist als die Nenn-Durchflussmenge,

wobei in dem Teillastbetrieb ein erster Gasstrom von dem Edukt-Gasgemisch abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird und ein zweiter Gasstrom aus dem Produkt-Gasgemisch abgezweigt wird und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird.

- 2. Das Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf (10) gemessen wird, insbesondere der Druck des dem Ammoniakkonverter (3) zugeführten Edukt-Gasgemischs.

- 3. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Gasstrom und/oder der zweite Gasstrom in Abhängigkeit von einem Druck in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf (10), insbesondere dem Druck des dem Ammoniakkonverter (3) zugeführten Edukt-Gasgemischs, eingestellt wird.

- 4. Das Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Gasstrom in Abhängigkeit von einer Ammoniakkonzentration in dem Ammoniaksynthese-Kreislauf (10) eingestellt wird.

- 5. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Gasstrom mittels eines ersten steuerbaren Ventils (SBV) abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird.

6. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Gasstrom mittels mindestens eines zweiten steuerbaren Ventils (BV1, BV2) abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird.
7. Das Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Gasstrom mittels mehrerer zweiter steuerbarer Ventile (BV1, BV2) abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird, wobei ein erstes der zweiten Ventile (BV1) einen kleineren Durchflusskoeffizienten als ein zweites der zweiten Ventile (BV1) aufweist, und wobei zunächst nur das erste der zweiten Ventile (BV1) geöffnet wird, und dann dass zweite der zweiten Ventile (BV2) geöffnet wird.
8. Das Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite der zweiten Ventile (BV2) erst dann geöffnet wird, wenn erste der zweiten Ventile (BV1) vollständig geöffnet ist.
9. Das Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite der zweiten Ventile (BV2) erst dann geöffnet wird, wenn das erste Ventil (SBV) vollständig geöffnet ist.
10. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Wasserstoff mittels Elektrolyse hergestellt wird, die mit elektrischem Strom aus regenerativer Energie betrieben wird.
11. Das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen dem Eingang und dem Ausgang des Zirkulators (1) ein *AntiSurge*-Ventil (AV) angeordnet ist.
12. Eine Vorrichtung (100) zur Synthese von Ammoniak umfassend:
 - eine Zuführeinrichtung (50) zum Bereitstellen von Wasserstoff;
 - einen Ammoniaksynthese-Kreislauf (10) umfassend

einen Ammoniakkonverter (3) zur katalytischen Synthese von Ammoniak;

einen Zirkulator (1) zum Zuführen eines Wasserstoff und Stickstoff enthaltenden Edukt-Gasgemisches zu dem Ammoniakkonverter (3); und

eine Kühlstrecke (5) zum Auskondensieren von Ammoniak aus einem Produkt-Gasgemisch des Ammoniakkonverters (3);

wobei der Ammoniaksynthese-Kreislauf (10) dazu konfiguriert ist in einem Vollastbetrieb betrieben zu werden, in welchem dem Ammoniaksynthese- Kreislauf (10) eine Nenn-Durchflussmenge des Wasserstoffes bereitgestellt wird, und

wobei der Ammoniaksynthese- Kreislauf (10) dazu konfiguriert ist, in einem Teillastbetrieb betrieben zu werden, in welchem dem Ammoniaksynthese- Kreislauf (10) eine Durchflussmenge an Wasserstoff bereitgestellt wird, die geringer ist als die Nenn-Durchflussmenge, wobei in dem Teillastbetrieb ein erster Gasstrom von dem Edukt-Gasgemisch abgezweigt und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird und ein zweiter Gasstrom aus dem Produkt-Gasgemisch abgezweigt wird und zum Eingang des Zirkulators (1) geleitet wird.

13. Die Vorrichtung nach Anspruch 12, gekennzeichnet durch einen Druckregler (PIC), der dazu konfiguriert ist, einen Volumenstrom des ersten Gasstroms einzustellen, um den Druck des Edukt-Gasgemischs auf einen vorgegebenen Sollwert zu regeln.
14. Die Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Druckregler (PIC) zusätzlich dazu konfiguriert ist, einen Volumenstrom des zweiten Gasstroms einzustellen, um den Druck des Edukt-Gasgemischs auf einen vorgegebenen Sollwert zu regeln.
15. Die Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 oder 13, gekennzeichnet durch einen Konzentrationsregler (AIC), der dazu konfiguriert ist, einen Volumenstrom des zweiten Gasstroms einzustellen, um eine Konzentration von Ammoniak in dem Edukt-Gasgemisch auf einen vorgegebenen Sollwert zu regeln.

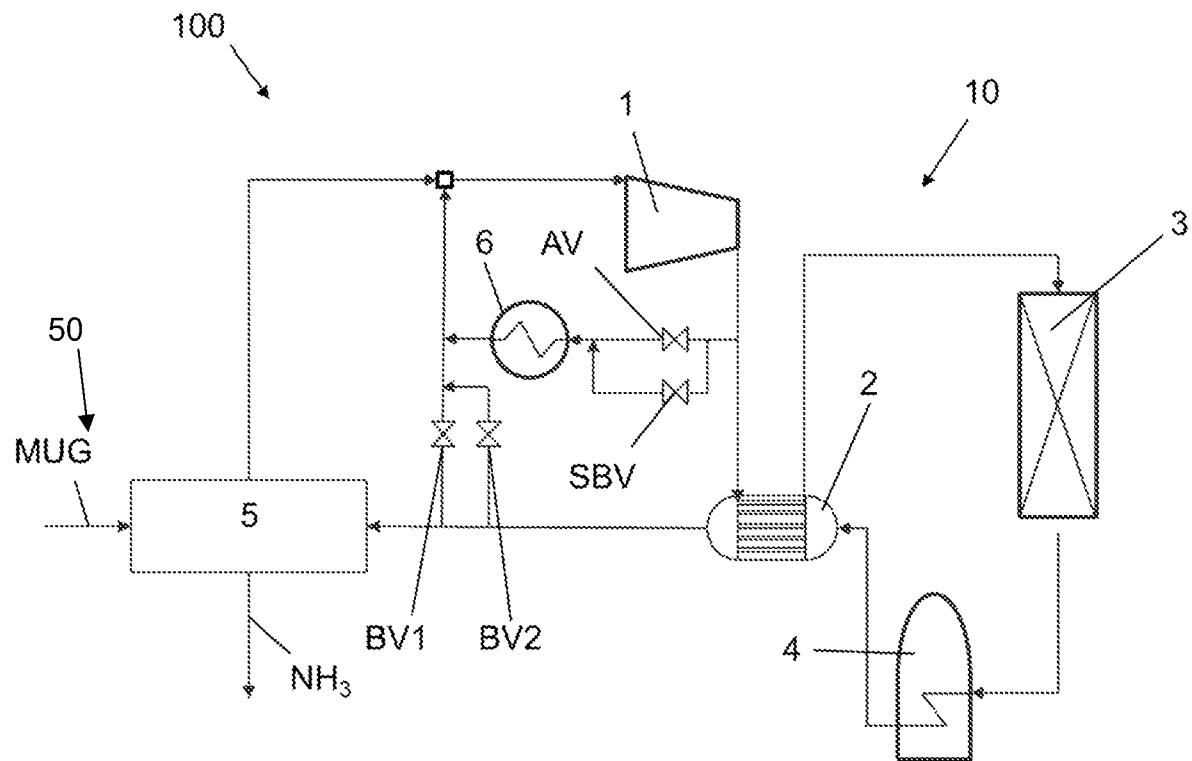


Fig. 1

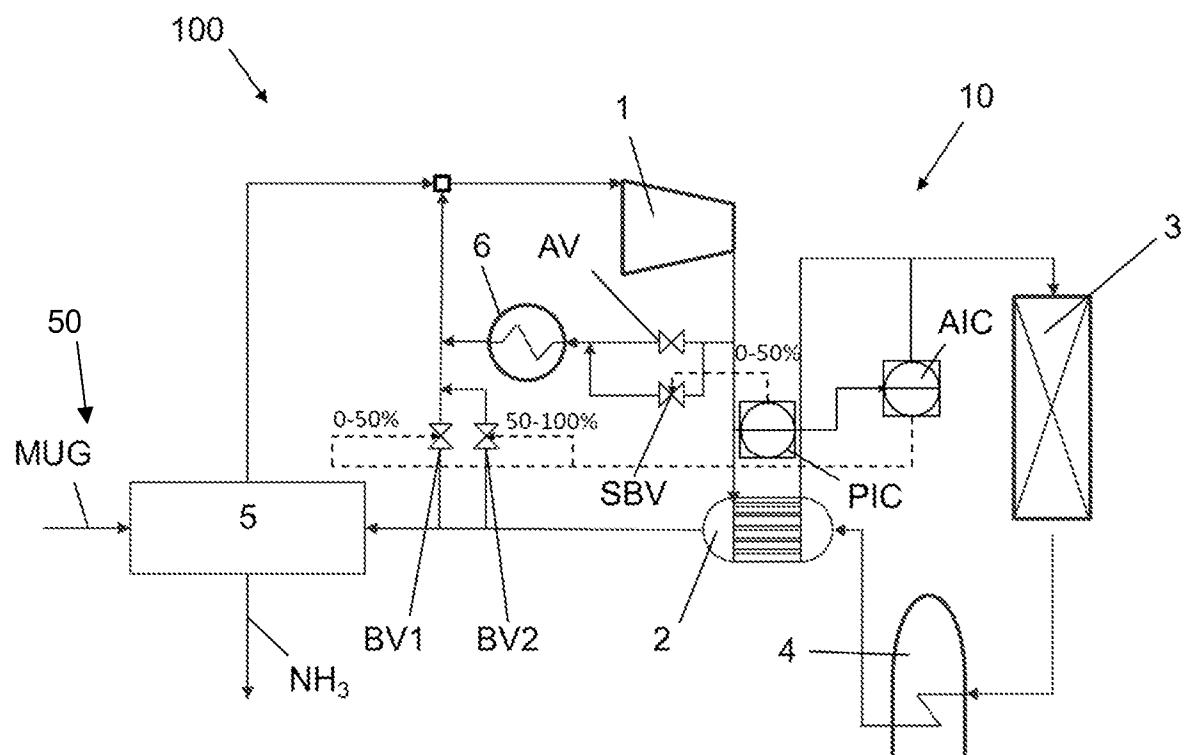


Fig. 2

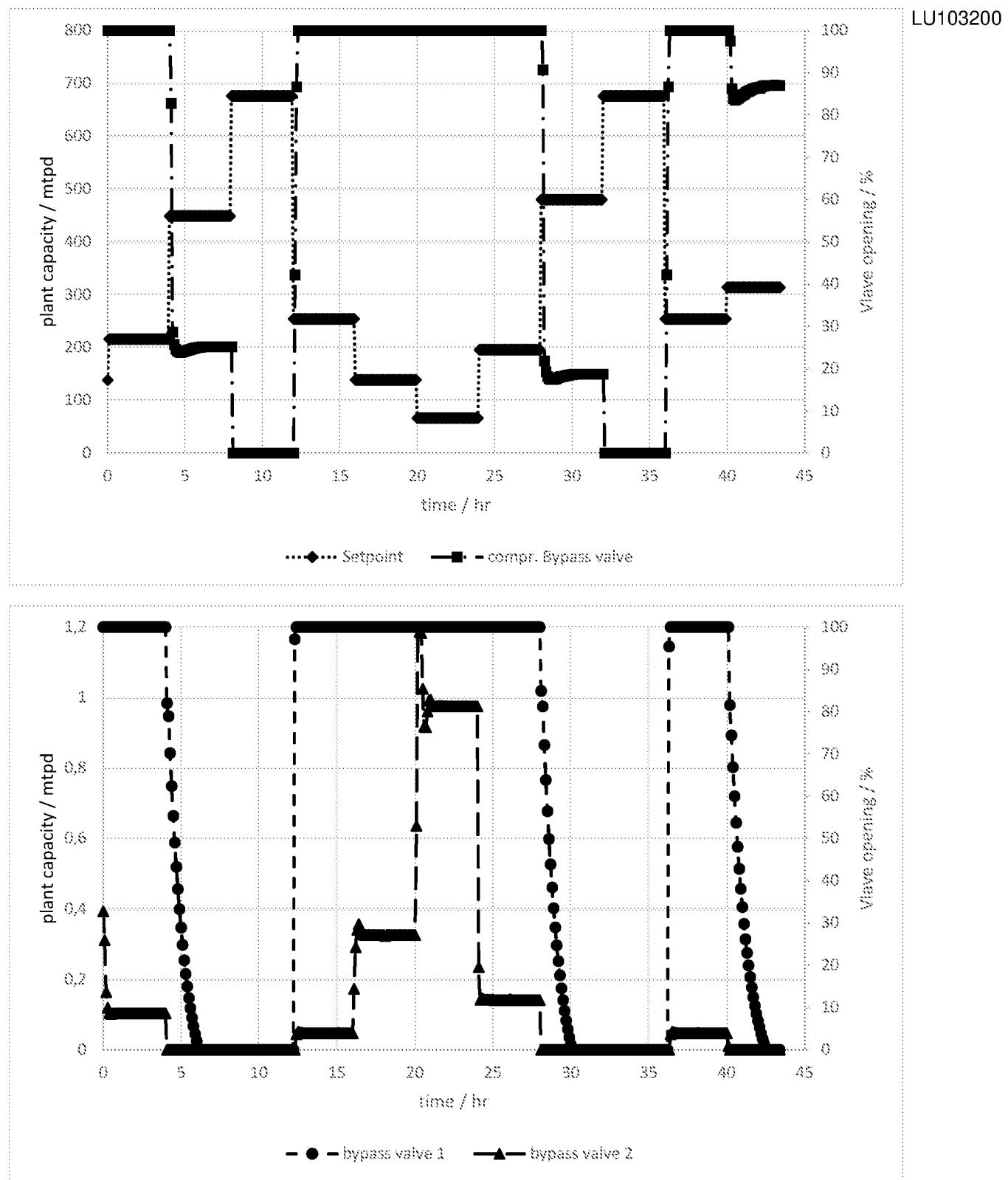


Fig. 3

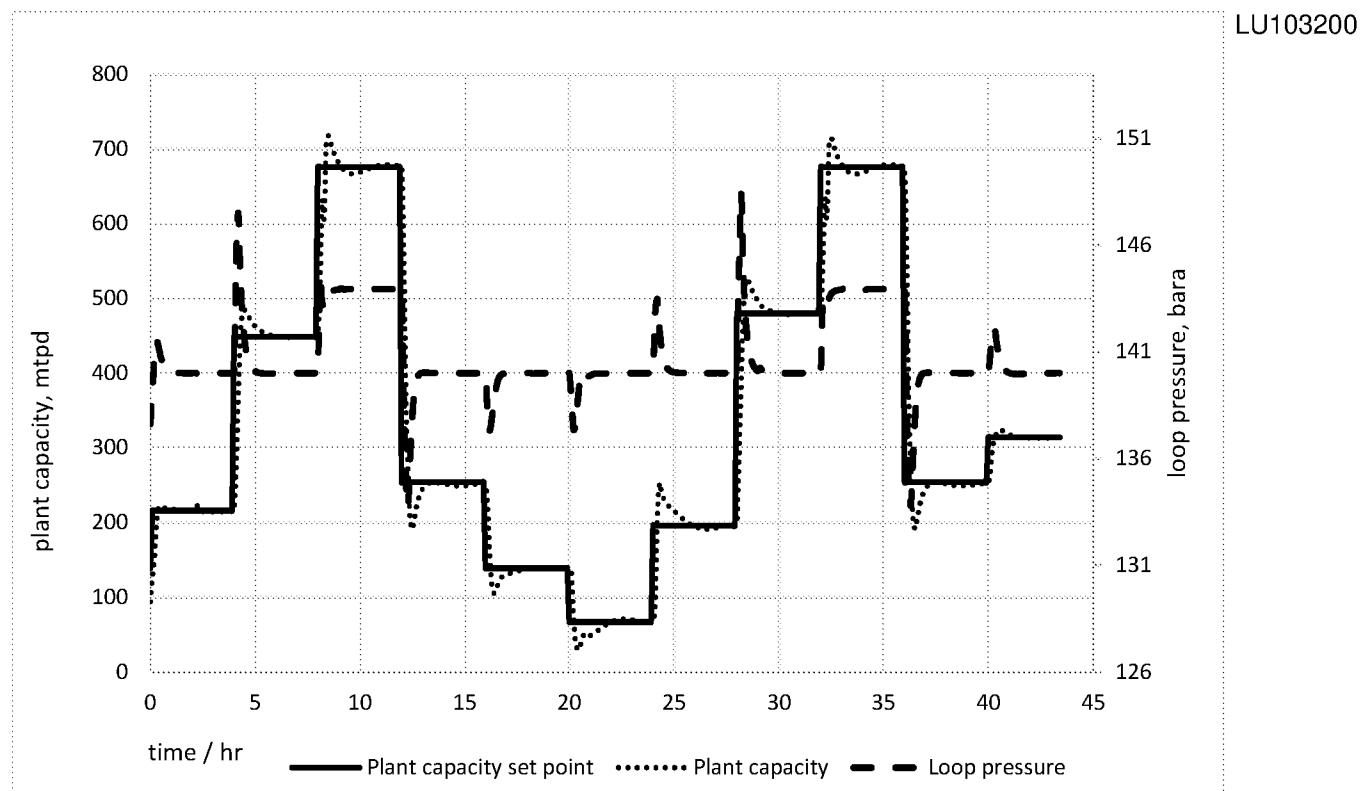


Fig. 4

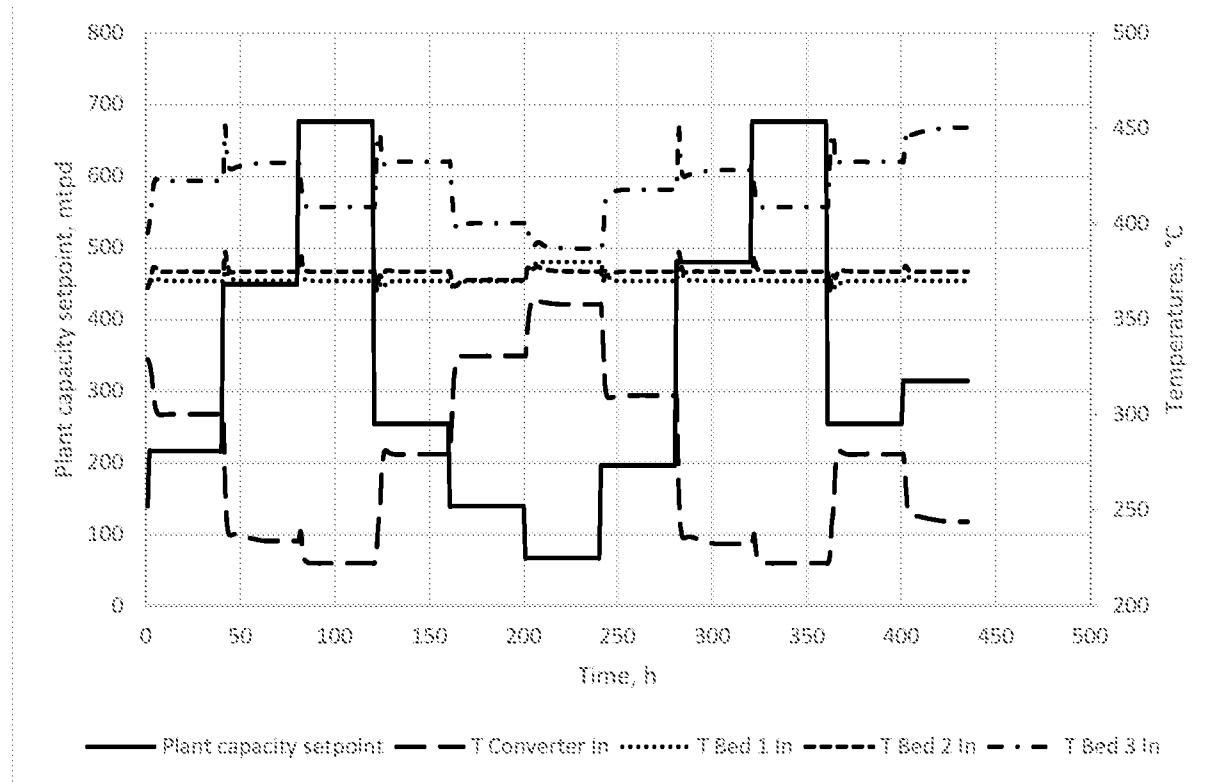


Fig. 5

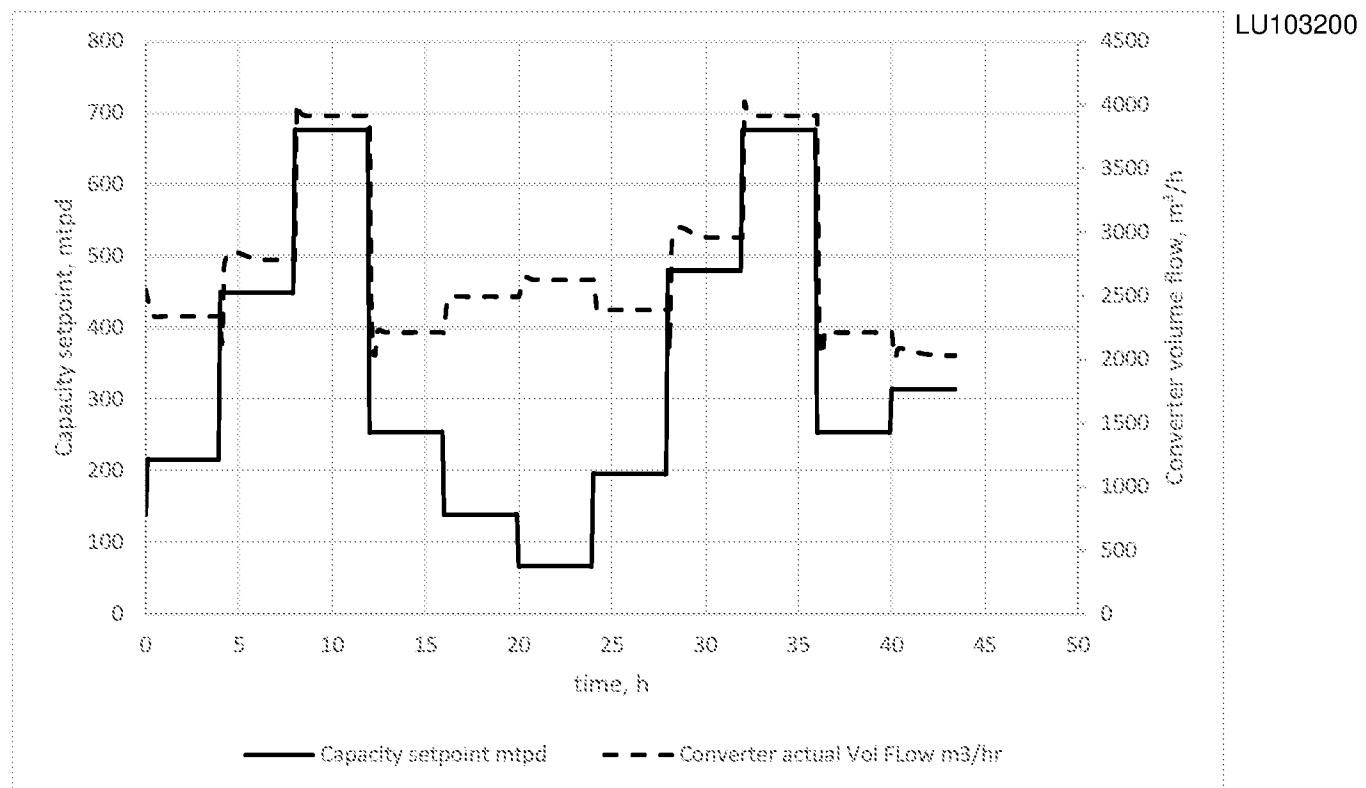


Fig. 6

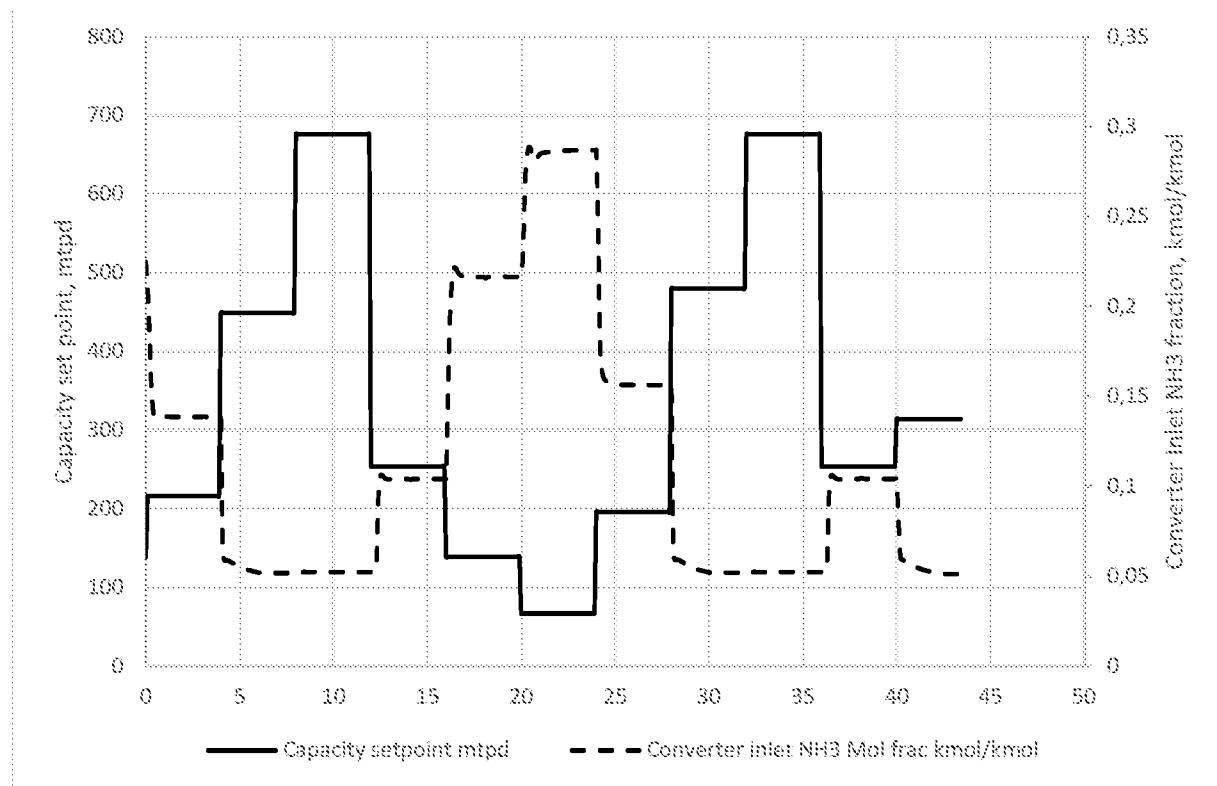


Fig. 7

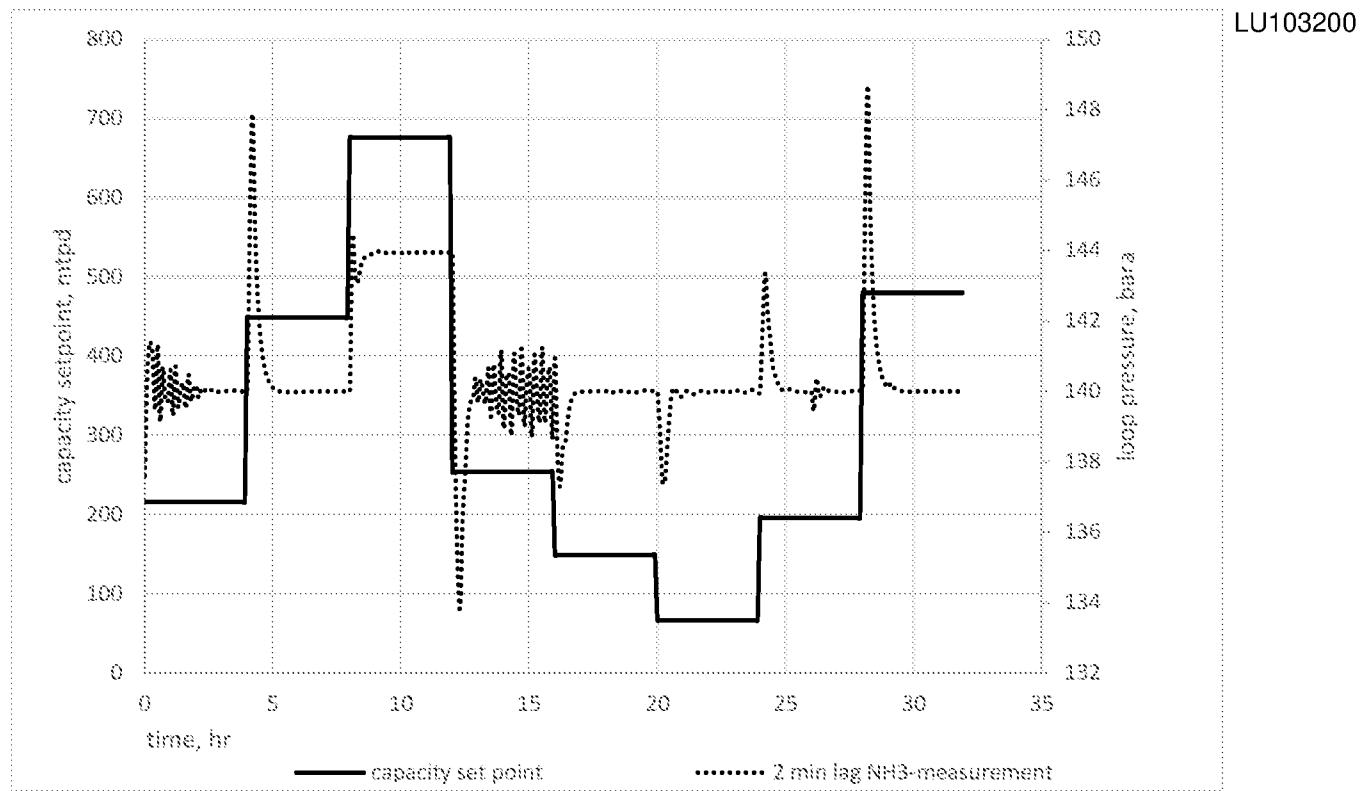


Fig. 8

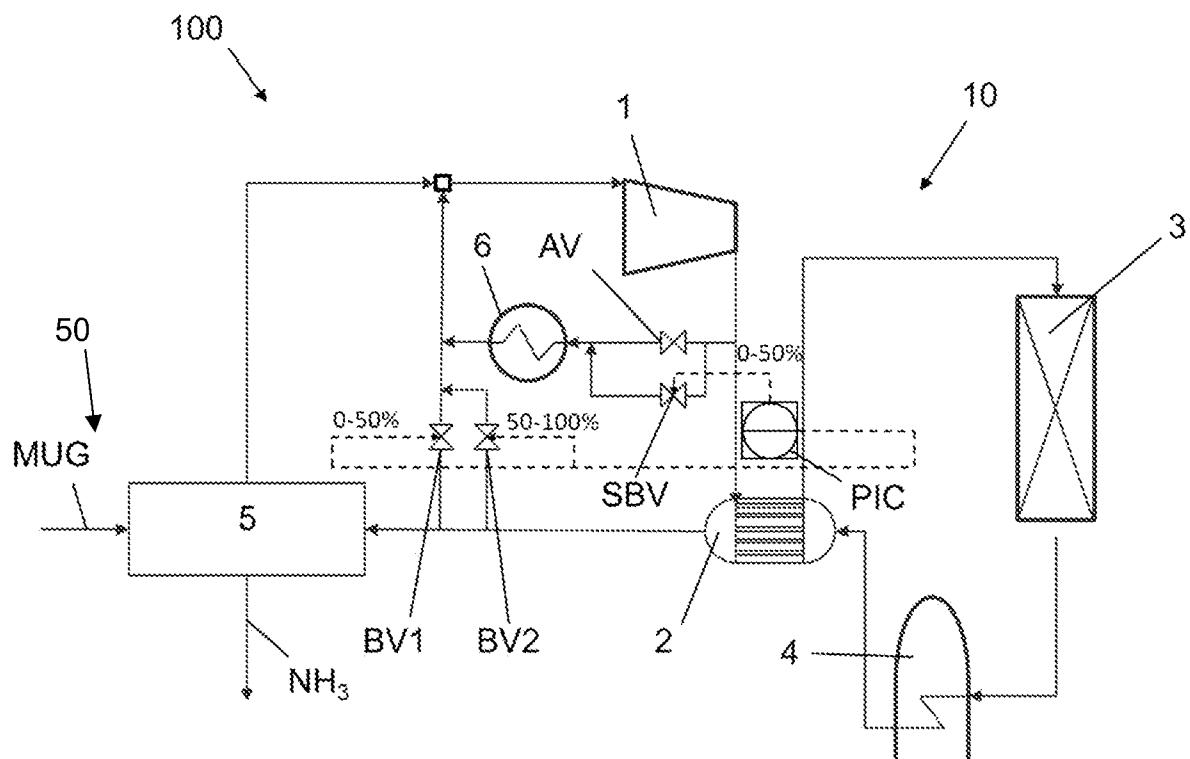


Fig. 9

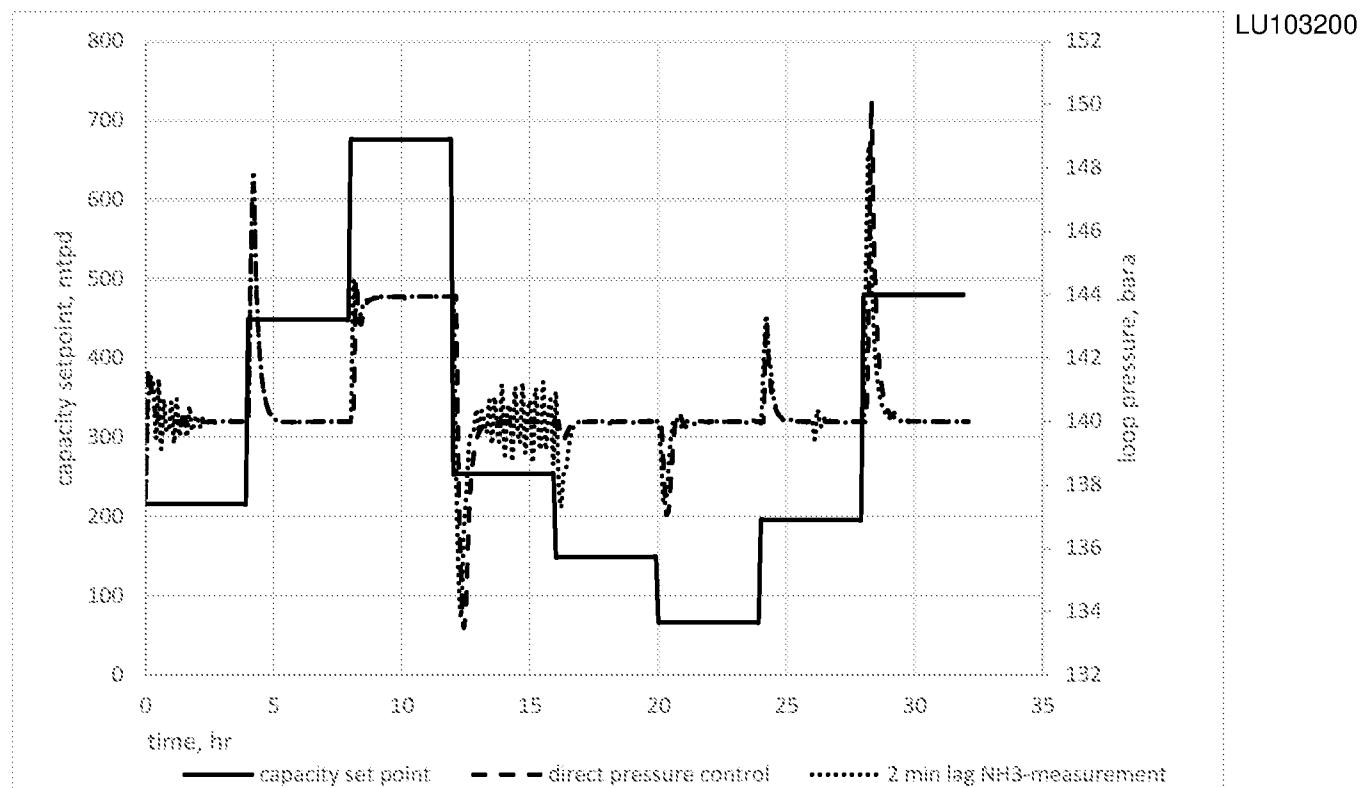


Fig. 10

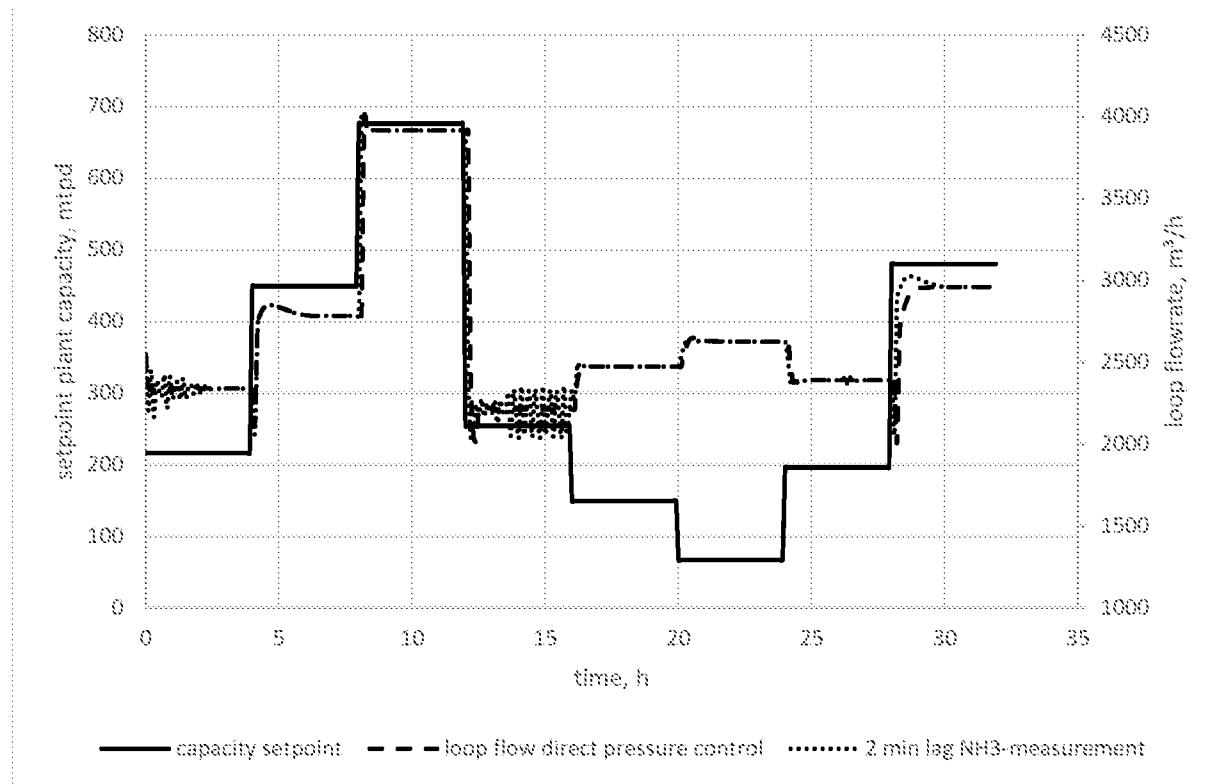


Fig. 11