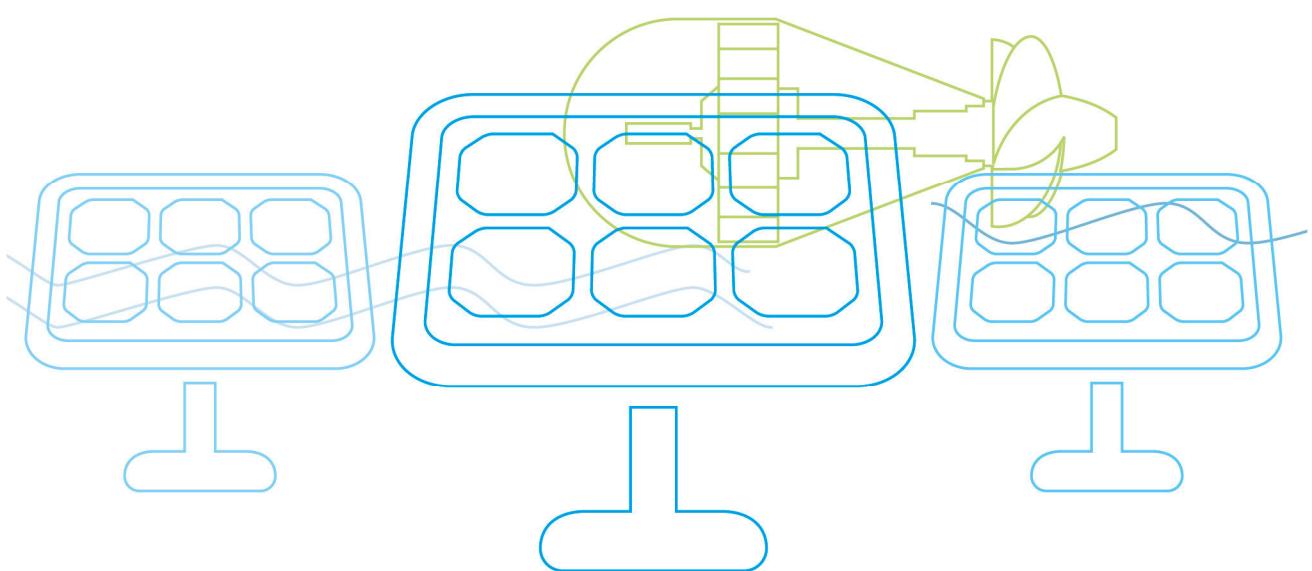




Entwicklung eines energiesparenden Aquasolv-Verfahrens zum Lignocellulose-Aufschluss (lignocellulose Rohstoffe) zur Bioethanolherstellung



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!



Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds



Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhalt

1.	Einleitung.....	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Schwerpunkt des Projektes.....	6
1.3	Einordnung in das Programm des Klima- & Energiefonds.....	9
1.4	Methodik und verwendete Methoden	11
1.5	Aufbau der Arbeit.....	13
2.	Inhaltliche Darstellung	14
3.	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	25
4.	Ausblick und Empfehlungen	25
5.	Danksagung	25
6.	Literaturverzeichnis	26

Kurzfassung (durchgeführtes Projekt 'Aquasolv')

Die als FFG-Projekt des Klima- & Energiefondsprogramms durchgeführte *Technische Durchführbarkeitsstudie 'Aquasolv'* ist dem Forschungsbereich Biomass to Liquid (BTL) gewidmet und stellt einen Klimaentlastungsbeitrag zur gegenwärtigen Situation dar. Ziel des Projekts war, ein Aquasolv-Verfahren mit abgesenktem Energieeinsatz im Aufschluss lignocelluloser Rohstoffe zu entwickeln und damit eine wirtschaftliche Produktion Bioethanols 2. Generation zu verwirklichen.

Haupthinderungsgrund zur Ethanolproduktion ist bisher die aufwändige Aufbereitung der Rohstoffe. Das am Institut bestehende Aquasolv-Verfahren ist in der Lage, Lignocellulose durch Thermohydrolyse nur durch Wasser (in div. Aggregatzuständen), im Temperaturkorridor zwischen 180 und 220 °C, aufzuspalten, bei Null-Emission und ohne Katalysatoren. Im Rahmen des Projekts ist die Entwicklung des *Aquasolv new*, in Gestalt eines neuen, ins bisherige Aquasolv integrierten Prozessschritts, erfolgt und die angestrebte Absenkung des Energieeinsatzes im Aufschluss gelungen.

Mithilfe des neuen Verfahrens sollte der entscheidende Schritt zur Wirtschaftlichkeit der Bioethanolproduktion aus lignocelluloser Biomasse gemacht sein.

Das Verfahren besitzt unseres Erachtens bedeutendes Potential in Österreich als Agrar- (Stroh aus Getreideanbauregionen Ostösterreichs) und Waldland, aber auch weltweit (ohne Rodungen oder sonstige Änderungen bestehender Ökosysteme nach sich ziehend).

Die prozesstechnischen Arbeiten wurden mit der am Institut bestehenden 2,5-l-Kleinanlage bewerkstelligt.

Das neu entwickelte Aquasolv-Verfahren wurde mehreren Tauglichkeitsprüfungen unterzogen:

Bei sehr zufriedenstellenden *Gravimetrischen Bilanzen* (Massenbilanz) wurden die Aquasolv-Produkte Extrakt und Rückstand erfolgreich enzymatisch verzuckert.

Die Vergärung der freigesetzten Zucker erfolgt im Anschluss an das Projekt.

Ein weiteres Vorhaben ist der Bau der im Projekt entworfenen *Aquasolv new*-Pilotanlage.

Abstract (accomplished project 'Aquasolv')

Our accomplished technical feasibility study *Aquasolv*, *Österreichische Forschungsförderung* project (*FFG*), under the leadership of the *Österreichischer Klima- & Energie-Fonds* programme (*Climate & Energy Fonds*, Austrian Federal government), focuses on the technical field of biomass to liquid (*BTL*) process and represents a contribution to climatic relief of today's situation.

The project aim was to develop an *Aquasolv* process with lowered energy input in the course of the fractionation of lignocellulosic raw materials, with the object of realising an economical production of the second generation bioethanol.

The main hindrance to ethanol production is, up to now, the energy-consuming pretreatment of biomass raw material. The *Aquasolv* process, introduced by our Institute, is capable of fractionating lignocellulose by thermohydrolysis, applying only water (diverse states) in the temperature corridor from 180 to 220 °C, at zero-emission and without any catalyst.

Within the project we succeeded in decreasing energy consumption for the fractionation by the development of *Aquasolv new* – a new process step, integrated in the previous *Aquasolv*. By means of the new procedure an important step to economy of ethanol production from lignocellulosic biomass may have been achieved.

Aquasolv new has, in our opinion, important potential in Austria as an agricultural (straw from cereal cultivation regions of East Austria) and a forested country, but also worldwide (without the destruction of woodlands or forced changes of existing ecosystems).

The process work was carried out with the 2.5-l-small scale equipment at our Institute.

The developed *Aquasolv new* was subjected to several valuations of suitability: after delivering satisfying *Gravimetric Balances* (mass balance) the *Aquasolv* products, extracts and residue, were successfully saccharified.

The fermentation of the released sugars will take place subsequent to the project.

A further intention is the construction of the designed *Aquasolv new* pilot equipment (medium scale).

1. Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung der als Projekt geförderten Arbeit besteht in der Absenkung des Energieeinsatzes im seit langem am Institut bestehenden und kontinuierlich weiterentwickelten *Aquasolv*-Verfahren.

Aquasolv ist ein Verfahren zum Aufschluss pflanzlicher Biomasse, ausgerichtet auf die Mobilisierung der in der Pflanzenzellwand gebundenen Saccharide, um im Hauptstoffstrom über den Weg der Verzuckerung und Vergärung Bioethanol zu liefern – Bioethanol 2. Generation bzw. Bioethanol aus Lignocellulose zu produzieren.

Im Rahmen des FFG-Projekts, Neue Energien 2020, 1. Ausschreibung, in der Kategorie *Technische Durchführbarkeitsstudie* soll die grundsätzliche Möglichkeit (Grundlagenforschungscharakter) und vor allem durch praktische Versuche die grundsätzliche Machbarkeit sowie die Prüfung auf Tauglichkeit eines neuen Verfahrens geklärt werden, unser Vorhaben ist erstmals niedergelegt im Projektantrag (Mai 2008).

Innerhalb des Projekts steht die Integrierung des entworfenen, neuen Processschrittes in das bestehende *Aquasolv* ursächlich an vorderster Stelle und – bei erfolgreicher Umsetzung die Etablierung des *Aquasolv new*.

Aquasolv ist in seiner Existenz und Konzeption ein Glücksfall zu nennen, da seit der Erfindung seine Grundzüge (1. Patent mit Anmeldetag 9.7.1965) [1] beizubehalten waren, aber stets Spielraum zur Weiterentwicklung blieb, d.h. Effizienzsteigerung in Form der Senkung des Energieeinsatzes im Aufschluss zuließ.

1.2 Schwerpunkt des Projektes

Österreich ist zwar ein kleinflächiger Binnenstaat, besitzt aber als zentrales Alpenland durch seine Topographie eine privilegierte Möglichkeit zur Nutzung der Wasserkraft – allein die Donau fließt auf österreichischem Staatsgebiet mit 60 % des Gesamtgefälles ihres Flussbetts, bei nur 12 % ihrer Gesamtlänge.

Unter den erneuerbaren Energien liefert Wasserkraft Strom, vielfältigst verwendbar und verwendet, welcher aber doch in seinem Grundcharakter, abgesehen von elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln, ein ortsgebundenes Energiemittel darstellt.

Mobilitätsvorgänge wie Personen- & Warentransport am Land, über Wasser und in der Luft, werden auch zumindest in mittelfristiger Zukunft vorrangig durch Verbrennungsmotoren ermöglicht werden.

Der exzessive Verbrauch der aus dem Erdöl stammenden Treibstoffe zum Betrieb verschiedenster und in ihrer Anzahl immer noch ansteigender Motoren hat zu exzessiven Emissionen an CO₂ in der Atmosphäre geführt, was den, nunmehr allgemein anerkannten, gegenwärtigen Treibhauseffekt verursacht hat und weiter verursacht.

Energieerzeugung unter CO₂-Neutralität ist ein Gebot der Stunde.

Modellrechnungen des IPCC zeigen, dass ein Temperaturanstieg Veränderungen ganzer Ökosysteme bringt – vordergründige und verhältnismäßig leicht einsehbare Folge ist der Meeresspiegelanstieg (mit dramatischen Folgen für die besiedelten Küstenregionen, massiv betroffen hierbei der asiatische Raum mit seinen am Meer liegenden Megacities).

Österreich kann CO₂-neutrale Energie aufbringen und zu CO₂-neutraler Energie beitragen.

Die Nachkriegsjahre bzw. die Wirtschaftswunderjahre sind im Zeichen der technischen Nutzung der Wasserkraft zur Stromerzeugung gestanden, durchaus erfolgreich und in den Leistungen anerkennenswert.

Die späten 70er und frühen 80er Jahre haben die erste Grüne Bewegung hervorgebracht, als ein Ergebnis daraus haben sich Technologien entwickelt, die heute etabliert sind, um Energie aus ökologischen Quellen verfügbar zu machen.

Die Summe aus gesellschaftspolitischen Strömungen und konkreten technischen Anstrengungen dieser Zeit hat Österreich weltweit, wie wir denken – zu Recht – den Ruf als Land des Umweltschutzes bzw. der Umweltschutzbetriebe & -technologie (verbunden mit entsprechenden Exporten) eingebracht.

Seitdem hat einerseits die Solar-Energie (direkte Nutzung der Sonnenstrahlung) und andererseits die Energie aus pflanzlicher Biomasse (indirekte Nutzung der Sonnenstrahlung durch Nutzung verschiedenster Substanzen der Photosynthese) das Spektrum der erneuerbaren Energien deutlich und nachhaltig erweitert.

Biomasse wird in Österreich traditionell als Brennholz zur Wohnwärmeerzeugung herangezogen. In den letzten Jahrzehnten ist – in enger Bindung zur Land- & Forstwirtschaft – ein durchaus engagierter und erfolgreicher Industriezweig zur Holzheiztechnik entstanden, welcher ausgerichtet ist auf die effiziente Verbrennung von Biomasse in Biomasseanlagen zur sowohl Wärme- als auch Stromerzeugung, um verschiedenste Siedlungseinrichtungen mit Energie zu versorgen.

Nicht unerwähnt sei der Bereich, der sich um die materielle Kehrseite der menschlichen Existenz kümmert – zum einen die Betriebe der Kläranlagen- & Abwasseraufbereitungskonzeption bzw. der Kläranlagenbauer einschließlich der Betreiber, und zum anderen die Betriebe der Müllentsorgung.

Eine geordnete und möglichst lückenlose Kanalisierung der Abfälle (Industrie und Haushalte) in Richtung Kläranlagen bzw. Deponien schafft die Möglichkeit des Sammelns der aus dem Abbau biogener Stoffe entstehenden Faulgase. Eine Vorgangsweise, die einen wertvollen Teil zur Verhinderung eines weiteren Anfachens des Treibhauseffekts darstellt. –

Durch die gezielte Verbrennung der Gase, auf die Koppelung mit energieumwandelnden Prozessen ausgerichtet, wird das extrem klimarelevante Methan (20fache treibhausfördernde Wirkung des Kohlendioxids) zu Kohlendioxid umgesetzt, welches zumindest für den Kohlenstoffanteil aus biogenem Ursprung klimaneutral ist.

Ein Unternehmen in Österreich besitzt erfreulicherweise weltweit führendes Know-how in der Nutzung der Faulgase zum Betrieb von Gasmotoren – mit sehr hoher Effizienz und großer Variabilität in der Gaszusammensetzung – zum direkten Stromgeneratorenantrieb.

Aber eine weitere Möglichkeit der Nutzung der Biomasse ist in Österreich aus dem Motto 'Hände und Köpfe als Rohstoff' [2] erwachsen – die Verflüssigung der Biomasse (engl. biomass-to-liquid, Kürzel BTL), vorrangig Biodiesel und Bioethanol.

Unsere Arbeit ist der Produktion Bioethanols 2. Generation bzw. Bioethanols aus lignocelluloser Biomasse gewidmet und besteht aus den Anstrengungen der kontinuierlichen Weiterentwicklung unseres Aufschluss-Verfahrens Aquasolv zur Fraktionierung der nativ kompakten Biomasse.

Bei Gelingen unserer Anstrengungen, Biomasse 2. Generation (Kürzel, dt. & engl. Bioethanol 2GN) zur Marktreife zu bringen, erfährt der österreichische Staat eine doppelte Wohlfahrtswirkung.

Bei der Verbrennung von Bioethanol lignocelluloser Herkunft entsteht klimaneutrales CO₂, welches die CO₂-Emissionsbilanz nicht belastet (Kyoto-Protokoll, Emissionshandel). Die weitere wirtschaftliche Bedeutung, die Bioethanol 2. Generation zukommt, wird – unter der Voraussetzung der Produktion und Beimischung namhafter Mengen – dann klar, wenn bedacht wird, dass das Handelsbilanzdefizit 'Brennstoffe und Energie' bzw. 'Primärenergieträger' allein im Jahr 2009 nahezu 7 Mrd. Euro betragen hat [3].

Jede nicht aus Erdöl entspringende Energiequelle macht Österreich etwas weniger abhängig von Fossilenergieversorgern – und damit vom existierenden Wirtschaftsgefüge.

Einerseits wird das Handelsbilanzdefizit im Energiebereich gebremst, andererseits wird die Hebelwirkung der massiv angestiegenen und weiter ansteigenden Preise der Primärenergieträger auf die inländische Teuerung abgeschwächt [4].

Weiters hat unser Vorhaben durch die Nutzung und Umformung lignocelluloser Biomasse Potential zu nationaler Wertschöpfung und der Schaffung von Arbeitsplätzen – und weltweites Potential zur Anwendung.

Unser Verfahren kann zu einem neuen Bindeglied, aber auch Drehscheibe zwischen der Land- & Forstwirtschaft – ein Bereich mit großer Tradition, aber auch gegenwärtig großen Umbrüchen – und der Transportwesenindustrie werden.

Das schon vor Jahrzehnten am Institut eingeführte und stetig weiterentwickelte *Aquasolv*-Verfahren ist in der Lage, pflanzliche Biomasse, konkret Pflanzenzellwand als überdauernde Komponente, durch Thermo hydrolyse im Temperaturkorridor zwischen 180 – 220 °C nur durch die Anwendung des Wassers (in div. Aggregatzuständen) aufzuspalten.

Das zum Zeitpunkt des Antrags bestehende *Aquasolv* sollte im Rahmen des Projekts durch die processtechnische Abwandlung eine Optimierung erfahren, die den Schritt zur Wirtschaftlichkeit der Bioethanolproduktion aus lignocelluloser Biomasse bzw. der Produktion Bioethanols 2. Generation bringt, zur Einführung unseres Processes im In- und Ausland.

Last but not least ist auf den hohen ethischen Standard, sowohl für In- als auch Ausland bedeutend, hinzuweisen, den unser Verfahren erfüllt – aus dem Inhalt sicherlich relevanten Zeitungsartikel, treffen in unserem Fall nur die letzten Zeilen bezüglich technische Ausstattung bzw. Motortauglichkeit der Automobile zu (s. Anhang) [5].

1.3 Einordnung in das Programm des Klima- & Energiefonds

Zur Orientierung der Einordnung unserer Arbeit in das Programm des Klima- & Energiefonds (Kürzel KLIEN-Fonds) diente uns der *Leitfaden zur Projekteinreichung, Neue Energien 2020, Forschungs- und Technologieprogramm, 1. Ausschreibung, Version 2.0, Wien am 19.3.2008* (kursiv formatierte Textpassagen sind daraus entnommen, stehen im Range von Zitaten).

Ausrichtung und Ziele des Programms

Der Forschungsinhalt unserer Arbeiten besteht in der *Nutzung erneuerbarer Energieträger*. Unsere Arbeit ist ausgerichtet auf die *Stärkung der Entwicklung und Verbreitung österreichischer Umwelt- & Energietechnologie* und steht im Zeichen der *Effizienz, Nachhaltigkeit und Systemerneuerung*.

Programmstrategie

Der thematische Inhalt unserer Arbeit befindet sich im Zentrum der Programmstrategie des KLIEN-Fonds' und besitzt gewissermaßen Grundlagenforschungscharakter, stellt aber gleichzeitig und im Überhang *technologische Forschungs- & Entwicklungsarbeit* dar, die letztlich zur Errichtung der im Projekt konzipierten *Pilotanlage* führen soll, um unser 'Aquasolv' in Marktnähe zu bringen.

Programmziele

In den *Programmzielen*, aus den drei Säulen *Energiestrategische Ziele, Systembezogene Ziele und Technologiestrategische Ziele* bestehend, finden wir uns mit unseren Arbeitsinhalten in sehr guter Übereinstimmung, explizit nennen wir daraus – Gleich das erstgenannte *Energiestrategische Ziel – Kriterien der Nachhaltigkeit: ökologisch, ökonomisch und sozial dauerhaft* – steht ebenso für unsere Anstrengungen.

Die zweite Säule *Systembezogene Ziele* besteht zu allererst aus der *Reduktion des Verbrauchs fossiler Energieträger* und der *Erschließung Ressourcen erneuerbarer Energieträger*, weiters aus der *Effizienz der Treibhausgas-Reduktion*, beide Ziele decken sich ausgezeichnet mit unseren Inhalten.

Aus der dritten Säule *Technologiestrategische Ziele* heben sich im Zusammenhang mit unserem Arbeitsgebiet reliefartig die *Erhöhung des inländischen Wertschöpfungsanteils*, sowie das zu allerletzt genannte Ziel der *Kooperationen mit Unternehmungen aus Industrie* heraus – durch die soeben geäußerte Absicht des Baus einer Pilotanlage eines unserer ureigensten Ziele.

Themenfelder

In der im *Leitfaden für die Projekteinreichung* (Version 2.0, Wien, 19.3.2008) unter Kapitel 3.0 ausgebreiteten Landschaft befinden wir uns thematisch in 3.2 *Fortgeschrittene biogene Brennstoffproduktion*, das Feld, das wir im Rahmen des Projekts über knapp 3 Jahre hinweg bestellt haben, befindet sich im Unterkapitel 3.2.2 *Biogene Reststoffe als Rohstoffbasis*. 'Aquasolv' ist ein *Niederdruck- bzw. Niedertemperaturprocess* zur mehrstufigen *Umwandlung biogener Reststoffe* – konkret Getreidestroh, Abfallholz oder Fruchtrückstände – in Bioethanol 2. Generation.

'Aquasolv' stellt gegebenenfalls – im Hauptstoffstrom Glucose als Bioethanolproduzent, im Nebenstoffstrom Xylose als chemischer Rohstofflieferant – eine *energetisch-stoffliche Koppelnutzung* dar.

Unser Verfahren ist zukunfts-fähig – nach der Etablierung im Inland soll das Augenmerk der *Entwicklung und Kooperationen für neue Märkte* gelten.

'Aquasolv' hat Potential zu echter und tragfähiger Wohlfahrtswirkung in *Entwicklungs- & Schwellenländer*.

1.4 Methodik und verwendete Methoden

Methodik und Struktur des Projekts in Grundzügen:

Die im Antrag angestrebten Arbeiten wurden in ihren Inhalten zu Arbeitspaketen gruppiert, und im Projekt als solche durchgeführt.

Die Umsetzung sollte in Phasen bzw. stufenweise ansteigenden Niveaus erfolgen, wobei jedem Niveau eine Prüfung auf Tauglichkeit innewohnt – Stufenbau der Tauglichkeitsprüfung entsprechend dem Fortschritt der Arbeiten.

Die Planung und Umsetzung der Schritte, einem streng konsekutiven Bau folgend, führte zur Definition und Schnürung der Vorhaben zu sinnvollen Arbeitspaketen, in der jeweils das nachfolgende Arbeitspaket abhängig ist vom unmittelbar vorangehenden.

Arbeitspakete, Verwirklichung und Tauglichkeitsprüfung:

Die Arbeitspakete in aktueller Gültigkeit seien in kurztabellarischer Form angeführt:

Tab. 1 FFG-Projekt Aquasolv (Neue Energien 2020, 1. Ausschreibung) in Arbeitspaketen, Laufzeiten und Meilensteinen

AP Nr.	Titel Arbeitspaket (AP)	Dauer (Monate)	Meilenstein
AP1	<i>Aquasolv new</i> (<i>Aquasolv</i> -Verfahren mit gesenktem Energieeinsatz)	37	<i>Aquasolv new-Process</i>
AP3	Enzymatische Verzuckerung	7	Verzuckerung im Kolbenmaßstab
AP2 <i>new</i>	Reaktor-Mantel	6	Bau Reaktor-Mantel, Inbetriebnahme <i>Aquasolv</i> -Anlage mit Reaktor-Mantel
AP4	Vergärungsversuche	7	Etablierung Vergärungsstation
AP5	Konzeption <i>Aquasolv new</i> -Pilotanlage	3	Entwurf <i>Aquasolv new</i> -Reaktor

Existenzbegründende Grundlage für sämtliche nachgelagerte ist das Arbeitspaket 1 'Aquasolv new' – seine erfolgreiche Umsetzung ermöglicht die weiteren Arbeitspakete, mit Ausnahme Arbeitspaket 5 wird jedes Arbeitspaket zumindest einer Tauglichkeitsprüfung unterzogen:

- Arbeitspaket 1 Tauglichkeitsprüfung
 - Kernarbeitspaket
 - 'Quasolv new' Gravimetrische Bilanz zufriedenstellend ja / nein

nachgelagerte Arbeitpakete (in chronologisch durchgef hrter Reihenfolge):

- | | | |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| • Arbeitspaket 3
'Enzymatische Verzuckerung' | Tauglichkeitsprüfung, Forts.
Verzuckerbarkeit der Aufschlussprodukte | ja / nein |
| • Arbeitspaket 2 new
'Reaktor-Mantel' | "
Wärmetauschkapazität | ja / nein |
| • Arbeitspaket 4
'Vergärungsversuche' | "
Vergärbarkeit der aus den Aufschlussprodukten freigesetzten Zucker
in den Ansätzen | ja / nein |
| • Arbeitspaket 5
'Konzeption Aquasolv new-Pilotanlage' | | |

Verwendete Methoden:

Die in unserer Arbeit angewendeten Methoden, in Kurzform aufgelistet:

- Prozesstechnik inkl. automatisierter Datenaufzeichnung (*LabView*-Programm)
 - Analytische Methoden:
 - subjektive:
optische und olfaktorische Beurteilung der Aquasolv-Produkte Extrakte und Rückstand
 - objektive:
Gravimetrie
zur Erstellung Gravimetrischer Bilanzen
(Feststoffe, Feuchte, Wassergehalte; s. Tab. 2, S. 16 & Anhang)
Bestimmung des aus der Säurehydrolyse gewonnenen Lignins
(s. Abb. 3, S. 20 & Abb. 4, S. 21)

HPLC-Analytik

- zur Gehaltsbestimmung der Saccharide sowie div. Produkte im AP3 'Enzymatische Verzuckerung'
 - zur Gehaltsbestimmung der aus der Säurehydrolyse resultierenden Saccharide

IR-Spektroskopie (Tauglichkeit der Methode in prospektiver Anwendung geprüft)

1.5 Aufbau der Arbeit

Das Projekt besteht aus definierten Arbeitspaketen in gestaffelter Abfolge im Antrag, und im Projekt umgesetzt.

AP1 – Aquasolv new

Die Implementierung des *Aquasolv new* in Gestalt und Aufwand des Umbaus der bestehenden *Aquasolv*-Anlage (Kleinanlage mit 2,5-l-Reaktorvolumen) zur instrumentellen Durchführbarkeit des neuen Prozesses, aber auch die Durchführung der Versuche selbst, in Form der Biomasseaufschlüsse mit jeweiliger Aufstellung der *Massenbilanz*, in unserer *Aquasolv*-Arbeit *Gravimetrische Bilanz* genannt, werden als Arbeitspaket 1 gefasst.

Das Arbeitspaket 1 stellt den Schwerpunkt der Projektarbeiten dar – Kernarbeitspaket. Die erfolgreiche Umsetzung des AP1 ermöglicht alle weiteren Arbeitspakete.

AP3 – Enzymatische Verzuckerung

Die aus einem *Aquasolv new*-Versuch gewonnenen Produkte werden einer enzymatischen Verzuckerung zugeführt.

Die *Aquasolv*-Produkte sind der cellulosehaltige Rückstand und die hemicellulosehaltigen Extrakte, welche (hinsichtlich in Vorjahren durchgeführter Verzuckerungen) erstmalig verzuckert werden.

Die Durchführung des Arbeitspaketes (inkl. analytischer Auswertung) hat von Frühjahr bis Sommer 2010 stattgefunden.

AP2 new – Reaktor-Mantel

Das neu definierte Arbeitspaket 2 ist dem Bau des Reaktor-Mantels gewidmet und gilt der Umgestaltung der *Aquasolv*-Anlage.

Der Reaktor-Mantel dient dem Wärmetausch zwischen Reaktor und dem Mantel.

Die Verwirklichung des Vorhabens von der Planung bis zur Integrierung in die *Aquasolv*-Anlage hat sich vom Oktober 2010 bis März 2011 erstreckt.

AP4 – Vergärungsversuche

Die aus dem AP3 gewonnenen freien Zucker in den Verzuckerungsansätzen sollten durch Zugabe von Hefen zu Ethanol (Bioethanol) vergärt werden.

Zeitliche Planung der Durchführung des Arbeitspaketes ist von März 2011 bis September 2011 angesetzt worden.

AP5 – Konzeption *Aquasolv new*-Pilotanlage

Gegen Ende der Projektlaufzeit, Juli bis September 2011, ist der Entwurf des neuartigen *Aquasolv new*-Reaktors als Herzstück einer *Aquasolv new*-Pilotanlage erfolgt.

2. Inhaltliche Darstellung

Um die Bedeutung und den Stellenwert der Entwicklung des *Aquasolv new* nur ansatzweise begreiflich zu machen, wäre notwendig, den sich weit spannenden Bogen vom ursprünglichen *Aquasolv*, alias AEIOU-Verfahren (engl., akronym. Aqueous Extraction at Innsbruck's Old University), aus heutiger Sicht *klassisches Aquasolv* zu bezeichnen, zum gegenwärtigen *Aquasolv* in seinem Verlauf zu beschreiben.

Wir beschränken unsere Ausführungen aber auf den beibehaltenen Grundcharakter im Verfahren.

Die Patentbegründung des allerersten Patents im Jahr 1965 besteht hier in der Verwendung von alleinig Wasser als Aufschlussmedium, der hydrolytische Aufschluss erfolgt durch weiches und überhitztes Wasser.

Weiches Wasser ist eine processimmanente Notwendigkeit, um die erhöhte Autodissoziation bei erhöhter Temperatur zur vollen Wirkung zu bringen. –

Die hydrolytische Wirkung kommt zur Entfaltung und äußert sich durch regionales Aufbrechen der Wasserstoffbrücken- als auch kovalenten Bindungen an den gegenseitigen Bindungsstellen seiner Komponenten auf – Hemicellulose, Lignin und Cellulose werden zugänglich.

Aquasolv ist in seiner Konzeption von Beginn an eine Thermohydrolyse.

Weiterer Charakterzug des *Aquasolv* ist die Bewegung des flüssigen Mediums durch die eingesetzte Biomasse hindurch. Im Gegensatz zu bestehenden Verfahren ist im *Aquasolv* eine Durchströmung der Biomasse mit dem Medium vorgesehen.

Aquasolv arbeitet als Perkolation – auf Grund systemischen Drucks als akzelerierte Perkolation.

Akzelerierte Perkolation:

Die treibende Kraft der Perkolation des gegenwärtigen *Aquasolv* ist die Bewegungsenergie der Wassermoleküle im gasförmigen Zustand des Sattdampfes.

Das gegenwärtige *Aquasolv* arbeitet mit Sattdampf, wobei der Sattdampfdruck immer den maximalen Druck im Process darstellt, ein Vielfaches des Atmosphärendrucks.

Die Perkolation des Mediums im gegenwärtigen *Aquasolv* ist durch systemischen Sattdampf und den dadurch hervorgerufenen Druck akzeleriert.

Aquasolv ist verfahrenstechnisch in prägnantester Fassung eine akzelerierte Perkolys (engl. percolysis) mit Wasser als autokatalytisches Medium, vorwiegend im diskontinuierlichen Betrieb arbeitend.

Der Arbeitsbetrieb im *Aquasolv* stellt einen ausgewogenen Wechsel zwischen Akkumulation des Mediums und Fließvorgängen dar, letztere aus Extraktgewinnen und des Strömens des Mediums vom Reservoir in den Reaktor bestehend.

Vorzüge des Aquasolv-Verfahrens:

- Aquasolv auf die Verwendung überdauernder pflanzlicher Abfälle – Biomasse i.e.S. ausgerichtet
- Aquasolv arbeitet ausschließlich mit Wasser unter Nutzung der Selbstversauerung bei Temperaturerhöhung zum Aufschluss (Autokatalyse, Veränderung Ionenprodukt)
- Aquasolv arbeitet im Überhang im Dampfbereich mit dem Effekt der Denaturierung des Lignins – starke Minderung der irreversiblen Falschadsorption der Cellulasen am Lignin
- Aquasolv als Perkolation führt immanent zur Trennung hemicelluloser / celluloser Fraktion
- Aquasolv arbeitet mit Temperatur und Druck im geschlossenen System – Autoklavensystem führt zur Sterilisierung der Biomasse
- Aquasolv arbeitet anoxisch – keine oxidativen Umsetzungsprodukte

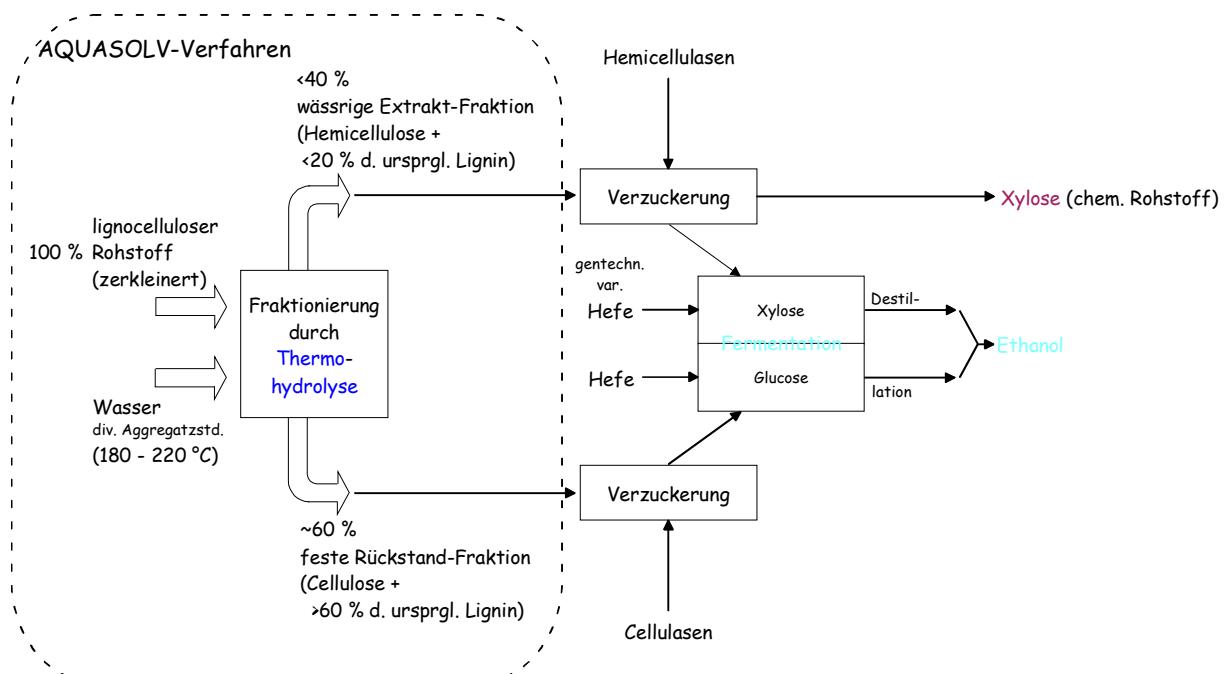


Abb. 1 Bioethanol-Herstellungsverfahren aus lignocelluloser Biomasse mittels Aquasolv-Aufschluss

Arbeitspakete in ihrer Umsetzung

AP1 'Aquasolv new' (Kernarbeitspaket)

Die Voraussetzung zur Umsetzung stellt die technische Umgestaltung der bestehenden *Aquasolv*-Kleinanlage dar, die Umgestaltung gilt einer Anlagenerweiterung zur Ermöglichung des *Aquasolv new*-Verfahrens.

Die Vorarbeiten (Planung etc.) zu den anlagentechnischen Umgestaltungsarbeiten, die Umgestaltungsarbeiten selbst sowie die Umsetzung als und wichtigsten Schritt – Voraussetzung aller anderen Arbeiten – der finden sich im Arbeitspaket 1 des Projektes – Arbeitspaket 1 ist das **Kernworkpackage** des Projektes.

Die Massenbilanz bzw. *Gravimetrische Bilanz* (engl. mass balance) ist das eingeführte Mittel, um die Qualität eines durchgeföhrten Aufschlusses objektiv zu beurteilen.

Die *Gravimetrische Bilanz* stellt das eingesetzte Rohmaterial und die aus dem Aufschluss gewonnenen Produkte Extrakt bzw. Extrakte (wässrige Phase mit Feststoffgehalt) und Rückstand (faserige Phase mit hoher Feuchte) in Trockengewichten gegenüber.

Im gegenwärtigen *Aquasolv*, syn. *Aquasolv new*, liegt der Prozentwert des Extraktfeststoffes bei knapp unter 35 %, gleich dem maximal möglichen Wert, der Prozentwert des Rückstandes idealtypisch bei 60 % – hoch reproduzierbares Indiz eines gelungenen Aufschlusses bzw. einer erschöpfenden Extraktion im *Aquasolv*.

Die Ergebnisse aus den Aufschläßen im *Aquasolv new* übertreffen sämtliche aus diversen *Aquasolv*-Processmodi und Anlagevarianten gewonnenen.

Zur Komplettierung der Gravimetrischen Bilanz beigetragen hat die Einführung des 2. Dampfextrakts.

Tab. 2 Gravimetrische Bilanzen aus 3 *Aquasolv*-Aufschläßen, 1 Aufschluss im bisherigen *Aquasolv*, Anlagemodifikation II, 2 Aufschlüsse im *Aquasolv new*, Anlagemodifikation III, *Aquasolv* behandeltes Weizenstroh als Rohmaterial (Bilanzen im Detail s. Anhang)

Versuch	Rohmaterial Einwaage	Aufschluss- Modus	Extrakte				Rückstand	Ausbeute	
	[g]		Dampfextrakt	Wasserextrakt	[g]	[%]	[g]	[%]	[%]
wstraw_31_modII	37,78	<i>Aquasolv</i>	1,42	3,77	8,21	21,72	21,93	58,05	92,06
					2,06	5,45			
					1,16	3,07			
wstraw_42_modIII	38,72	<i>Aquasolv new</i>	5,84	15,08	6,06	15,65	22,33	57,68	92,62
			1,63	4,22					
wstraw_45_modIII	39,26	"	3,63	9,26	7,78	19,82	23,55	59,99	94,17
			2,00	5,10					

AP3 'Enzymatische Verzuckerung'

Aus der Durchführung mehrerer Versuche im *Aquasolv new*, wobei das Verfahren von Versuch zu Versuch in planerischer Variation optimiert wurde, resultierte ein aussagekräftiger Datensatz (Processdaten, Gravimetrische Bilanzen etc.). Auf dessen Grundlage wurde der Zeitpunkt zur Durchführung des 1. Enzymversuchs mit den Produkten aus dem *Aquasolv new* festgelegt.
Das Aufschlussmaterial des 8. *Aquasolv new*-Versuchs ist zur enzymatischen Verzuckerung gelangt – und zwar Rückstand und **E x t r a k t e**.

Die erstmalige und im Rahmen des Projektes durchgeföhrte enzymatische Verzuckerung der *Aquasolv new*-Produkte ist Anfang Frühjahr 2010 erfolgt.

Der 1. Enzymversuch im *Aquasolv new* weist (i.V.z. am Institut bisher durchgeföhrter enzymatischen Verzuckerungen) mehrere grundlegende Neuerungen auf –

1. Enzymversuch *new*:

- Behandlung des Rohmaterials vor Aufschluss
eingesetztes Rohmaterial – einfache (bis doppelte) Häckselung des Strohs
- Vorbehandlung der Biomasse / Thermohydrolyse / *Aquasolv*-Aufschluss
Einbringung des gehäckselten Strohs in den Reaktor
unmittelbare *Aquasolv*-Behandlung im *Aquasolv new*-Process
- *Aquasolv*-Produkte **E x t r a k t e** und Rückstand zur Verzuckerung verwendet
- Größensprung zu einem mikrobiell üblichen Maßstab
Verzuckerung in 250 - m l - K o l b e n in Planung und Durchführung

Sowohl aus dem Rückstand als auch den Extraktten wurden die entsprechenden Monosaccharide Glucose bzw. Xylose freigesetzt – und zwar bereits bei sämtlichen Proben aus den Ansätzen (*engl.*, *sg.* enzyme assay) bereits bei der ersten Probennahme nach 4 h Inkubation.

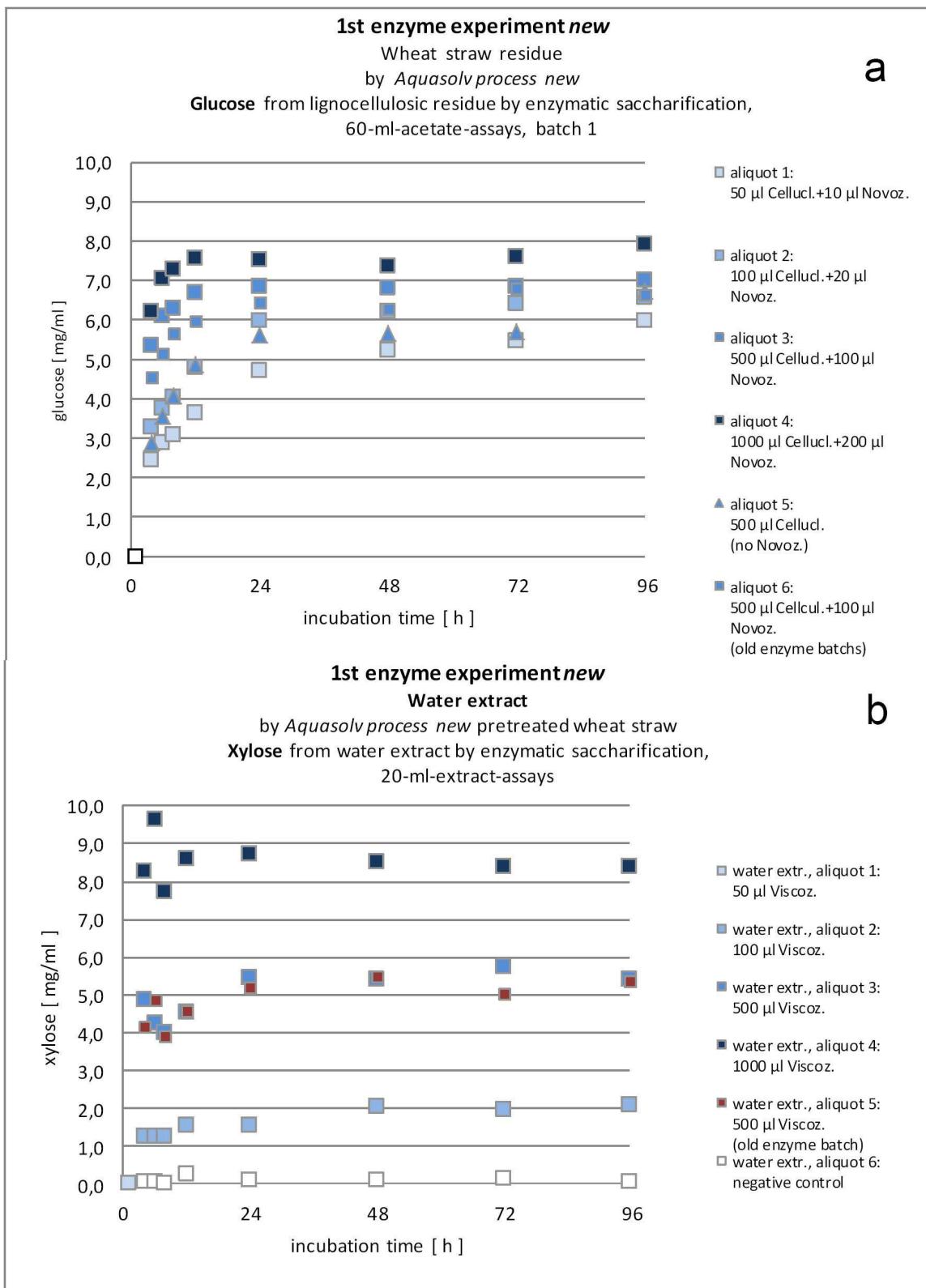


Abb.2 (a) Enzymatisch freigesetzte Glucose aus dem Rückstand des *Aquasolv new* vorbehandelten Weizenstrohs, Konzentrationen in div. Ansätzen (Aliquote div. Enzymmengen) im Inkubationsverlauf (Inkub. 50 °C, 100 rpm), (b) Enzymatisch freigesetzte Xylose aus dem Wasserextract des *Aquasolv new* vorbehandelten Weizenstrohs, Konzentrationen in div. Ansätzen (Aliquote div. Enzymmengen) im Inkubationsverlauf (Inkub. 50 °C, 100 rpm)

AP 2 new 'Reaktor-Mantel'

Planung, Bau und Integrierung eines Reaktormantels – Wärmetauscher der Aquasolv-Anlage bzw. Etablierung der Anlagemodifikation IV

Der Mantel als neues Anlageelement steht in der Funktion eines Wärmetauschers. Der Mantel wurde erfolgreich in die bestehende Anlage integriert, der Prozess erforderte eine stärkere Strukturierung.

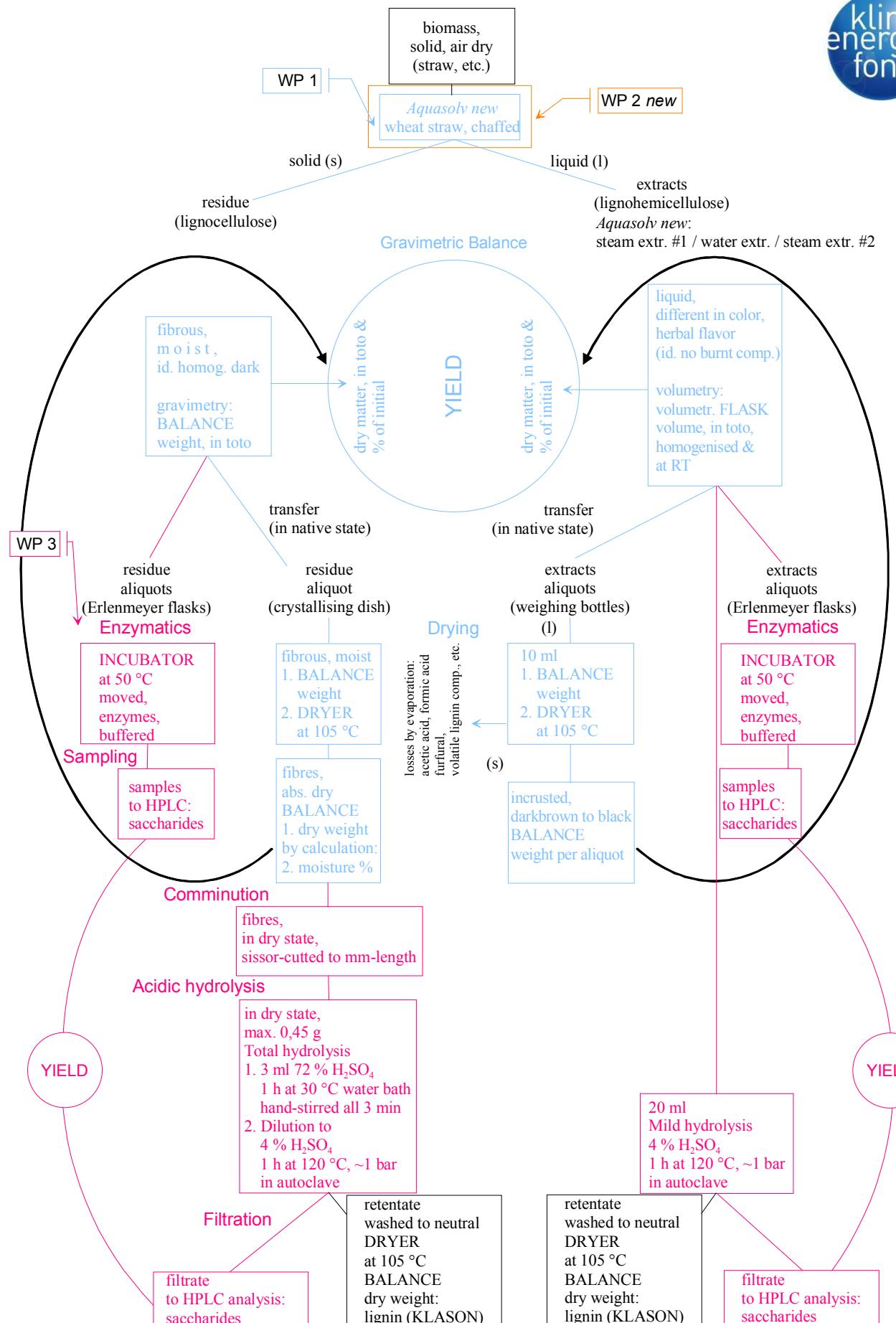


Abb. 3 Aquasolv-Arbeitsfluss in inhaltlichen Zusammenhängen & Abhängigkeiten, Arbeitsinhalte farblich nach Arbeitspaketen (WP1 ... Arbeitspaket 1 hellblau, WP3 ... Arbeitspaket 3 pink, WP 2 new ... Arbeitspaket 2 new orange)

Die folgende Abbildung zeigt Ergebnisse aus *Aquasolv new* behandelten Weizenstrohs, Werte aus Gravimetrischer Bilanz und Säurehydrolyse (engl. Acidic hydrolysis, Procedere s. Abb. 3) gewonnen.

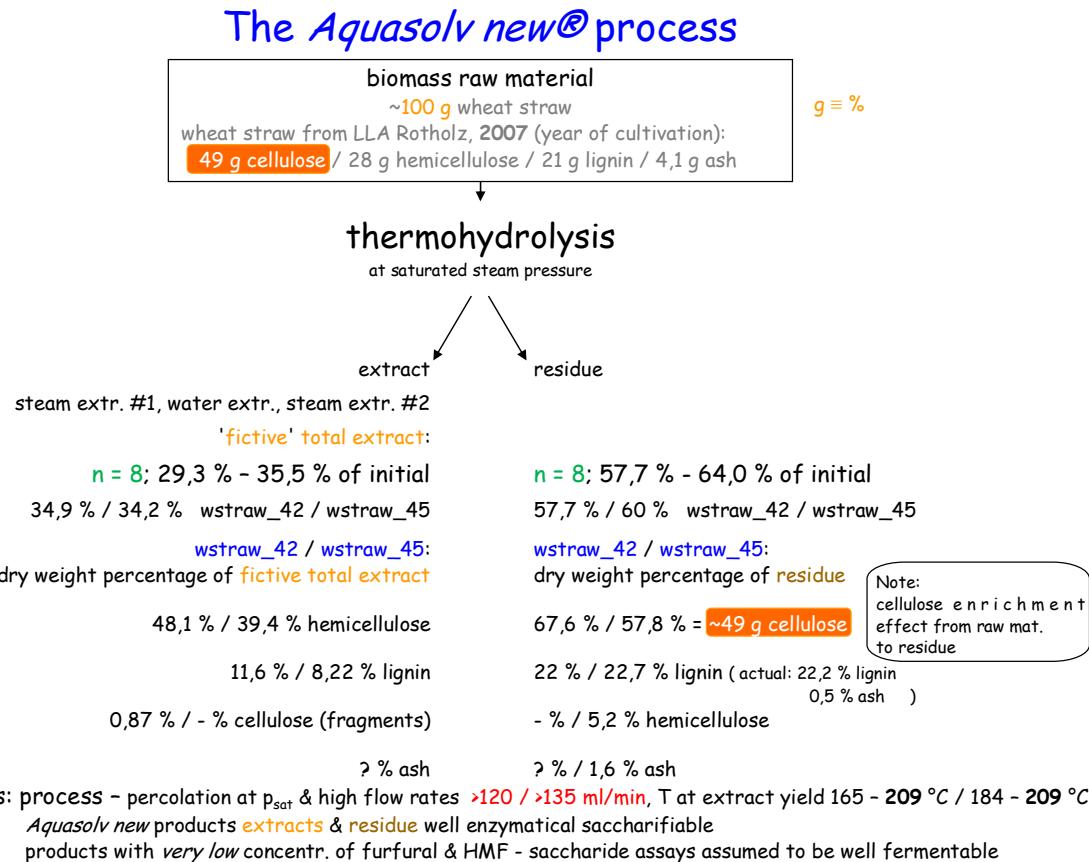


Abb. 4 Feststoffbilanzierung im *Aquasolv new*-Process:

Feststoffzusammensetzung des Biomasserohmaterials *Weizenstroh* (Werte aus Säurehydrolyse nach SAEMAN, vgl. Abb. 3 residue, Acidic hydrolysis), stoffliche Verteilung durch thermohydrolytische Fraktionierung im *Aquasolv new*-Process (Werte aus Gravimetrischer Bilanz, s. Tab. 1 & Anhang), Feststoffzusammensetzung der *Aquasolv*-Produkte Extrakt & Rückstand (Werte aus Säurehydrolyse, s. Abb. 3 residue bzw. extracts, Acidic hydrolysis)

AP4 'Vergärungsversuche'

Vorrangige Aufmerksamkeit in der Vergärung gilt der Glucose. – Entscheidend ist die Vergärbarkeit der Glucose mittels herkömmlicher Hefestämmen – aus den enzymatischen Ansätzen des Rückstands, bestehend aus den am Inkubationsende überwiegend lignosem Rückstandsrest, der enzymatisch aus der Cellulose freigesetzten Glucose, gegebenenfalls Resten an Hemicellulose bzw. ihrem Monomer Xylose sowie Abbau- bzw. thermischen Umsetzungsprodukten in sehr geringen Konzentrationen.

Aus der Literatur ist bekannt, dass die vorrangig auftretenden thermischen Umsetzungsprodukte Furfural bzw. Hydroxymethylfurfural (HMF) potente Inhibitoren der Hefen darstellen.

Damit rückt ins Bewusstsein, dass dieser Stufe hinsichtlich vorliegender Konzentrationen der Abbauprodukte in den Ansätzen eine gesamtwirtschaftliche Bedeutung des Vorhabens zukommt. –

Weisen die entsprechenden Ansätze niedrige Konzentrationen auf, die in ihrer Wirkung auf die zugesetzten Hefen unterkritisch bleiben, dann kann derselbe Assay am zeitlich festgesetzten Ende der enzymatischen Verzuckerung – unter Zugabe der Hefe samt Nährösung – einfach weiterverwendet werden.

Andernfalls muss die Glucose mittels physikalisch-chemischen Methoden überführt werden – was der Wirtschaftlichkeit deutlich abträglich wäre.

Allerdings ist zu betonen, dass durch den Perkolationscharakter des Aquasolv-Verfahrens Abbauprodukte ohnehin in Richtung Extrakte gedrängt werden und der Rückstand im Process davon kontinuierlich befreit wird.

Auf die enzymatischen Ansätze der Extrakte ist dies nur bedingt anwendbar, da sich die Xylose von vornherein nur durch gentechnisch veränderte Hefen vergären lässt. Wir sehen diesen Umstand aber keinesfalls unserem Verfahren abträglich – denn somit stellt die Xylose im Gesamtzusammenhang eine chemische Rohstoffressource dar – Allokation (Leitfaden zur Projekteinreichung).

Ursprünglich hatten wir beabsichtigt, die am Ende der Inkubation tiefgefrorenen Verzuckerungsansätze zu vergären, diese Absicht konnte in der Projektlaufzeit nicht umgesetzt werden.

Im Rahmen des Arbeitspakets 4 ist ein Literaturstudium erfolgt (Excerpt s. Literaturverzeichnis) [6] – [10].

Aus sämtlichen Publikationen geht hervor, dass im Zusammenhang mit Ansätzen zur Vergräfung von aus Biomassevorbehandlung stammender Zucker die Bedeutung der Konzentration der thermischen Umsetzungsprodukte Furfural bzw. Hydroxymethylfurfural entscheidend ist.

Die folgende Abbildung in Form von HPLC-Chromatogrammen der Extrakte aus dem Versuch 'wstraw_42_modIII' zeigt, dass die Konzentrationen der Abbauprodukte allein schon im nativen Zustand der Extrakte im Aquasolv new-Process mit einem Konzentrationsbereich Mikrogramm pro Milliliter äußerst niedrig sind.

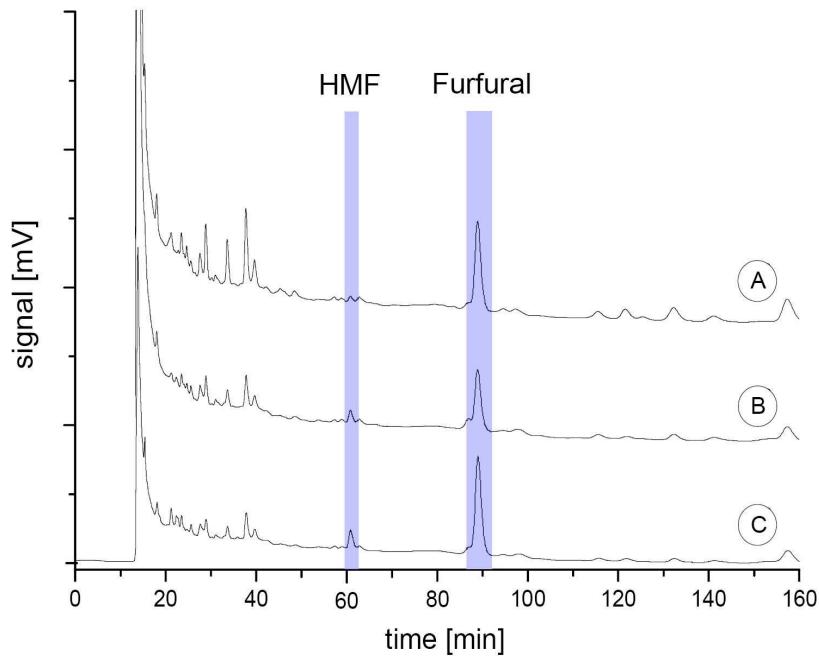


Abb. 5. Tandem-HPLC-Analyse der nativen Extrakte *steam extract #1*, *water extract* & *steam extract #2*, Aquasolv-Experiment 'wstraw_42_modIII', durchgeführt im Aquasolv new-Modus, Anlage-modifikation III; Extrakte aus der Aquasolv-Vorbehandlung von Weizenstroh; Vorbehandlung der Proben: Zentrifugation bei 10.000 rpm, 3 x 20 min;

HPLC-Bedingungen: Injektion: 20 µl, UV Detektion: 190 nm, Säulen: 2x Aminex HPX-87H mit stationärer PS-DVB-Phase, Temperatur: 75 °C, mobile Phase: 0.005 M H₂SO₄, Fluss: 0.5 ml/min, Druck: 60 bar; Einzelchromatogramme mit gleicher Signalintensität;

A steam extract #1 (HMF 3,10 µg/ml, Furfural 140,70 µg/ml), B water extract (HMF 8,52 µg/ml, Furfural 105,80 µg/ml), C steam extract #2

Wenn bedacht wird, dass die nativen Extrakte in den enzymatischen Verzuckerungsansätzen 2,5fach verdünnt wurden, bei anschl. stattfindender Vergärung, explizit der Xylose aus der Hemicellulose im Extrakt, durch die Zugabe der Hefesuspension die Ansätze eine weitere Verdünnung erfahren, sehen wir die Vergärbarkeit der Aquasolv new- Extract ansätze als ebenso gegeben.

Allerdings, wie schon ausgeführt, bedarf die Xylose gentechnisch veränderter Hefestämme. Zur Zeit bevorzugen wir aber ohnehin die Variante, in der die Extraktbehandlung mit der enzymatischen Verzuckerung der Hemicellulose endet – Xylose als stoffliches Ausgangsprodukt, diverse Stoffströme begründend.

AP 5 'Konzeption Aquasolv new-Pilotanlage'

Konzept Aquasolv-Pilotanlage:

Im AP5 ist die Konzeption einer *Aquasolv*-Pilotanlage erfolgt. Und zwar das Herzstück – der Entwurf des neuartigen *Aquasolv new*-Reaktors.

Die Konstruktion des Reaktors *new* ist zugegebenermaßen eine anspruchsvolle Konstruktion, in ihm sind mehrere Verfahrenskonzepte vereinigt – vorrangig nennen wir selbstverständlich unser *Aquasolv new*.

Die Konzeption erlaubt entsprechend dem Anforderungskatalog im Arbeitspaket 5 des Projektantrags, einen halbkontinuierlichen Taktbetrieb, hinsichtlich Beschickung und Entladung.

Der weitere konzeptive Neuentwurf des *Aquasolv new*-Reaktors ist die Möglichkeit der Integrierung des Elements der Dampfexplosion.

3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die inhaltlichen Ergebnisse sind im Kapitel 'Inhaltliche Darstellung' präsentiert bzw. eingearbeitet.

Das wichtigste Ergebnis aus der Projektarbeit ist das Vorhaben einer Erfindungsmeldung des im Rahmen des Projekts entwickelten *Aquasolv new*-Verfahrens.

4. Ausblick und Empfehlungen

Aus den dem Projekt nachfolgenden Tätigkeiten sehen wir vorrangig die Tätigung der Erfindungsmeldung.

Im weiteren beabsichtigen wir im Zusammenhang mit dem Projekt verbliebene Arbeiten wie die Vergärung durchzuführen, um den Arbeitskatalog zu vervollständigen.

Im Sichtfeld der praktischen Arbeiten sei das nächstwichtige Vorhaben genannt – die Umsetzung der entworfenen *Aquasolv new*-Pilotanlage, um *Aquasolv new* ins 'Leben' der industriellen Produktionsverfahren zur Erzeugung Bioethanols 2. Generation zu rufen.

5. Danksagung

Für die Ermöglichung der Durchführung der Arbeiten im Rahmen des Projekts bedanken wir uns bei den Institutionen *Österreichischer Klima- & Energiefonds* (KLIEN-Fonds, Wien), für die Finanzierung, und bei der *Österreichischen Forschungsfördergesellschaft m.b.H.* (FFG, Wien), für die organisatorische Durchführung.

Weiters gilt unser Dank dem Institut für Mikrobiologie, Forschungsgruppe *Mikrobielle Ökologie*, explizit Herrn Univ.-Doz. Heribert INSAM & Frau TA Mag. Sieglinde FARBMACHER, welche uns im Arbeitspaket 3 freundlichst unterstützt haben.

6. Literaturverzeichnis

- [1] BOBLETER, O & PAPE, G. Verfahren zum Abbau von Holz, Rinde und anderen Pflanzenmaterialien. Österreichisches Patent Nr. 263661
- [2] KOPEINIG M. Hände und Köpfe als Rohstoff. Kurier. 12.09.2008, S. 3
- [3] Außenhandelsstatistik Statistik Austria. Dickes fossiles Minus in der Außenhandelsbilanz. Ökoenergie. 82, März 2011, S. 5
- [4] KRONBERGER H. Fragt doch den Hofnarren!. Ökoenergie. 84, Oktober 2011, S. 18
- [5] SCHREGLMANN B. Welthunger: Biosprit ist Preistreiber. Salzburger Nachrichten. 13.10.2011, S. 19
- [6] ZALDIVAR J, NIELSEN J & OLSSON L. Fuel ethanol production from lignocellulose: a challenge for metabolic engineering and process integration. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2001, 56, pp. 17 – 34
- [7] OLSSON L, HAHN-HÄGERDAL, B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for ethanol production. *Enzyme & Microbial Technology*, 1996, 18, pp. 312 – 331.
- [8] VAN ZYL C, PRIOR B A & DU PREEZ J C. Production of Ethanol from Sugar Cane Bagasse Hemicellulose Hydrolyzate by *Pichia stipitis*. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 1988, 17, pp. 357 – 369.
- [9] MODIG T, LIDEN G, TAHERZADEH M J. Inhibition effects of furfural on alcohol dehydrogenase, aldehyde dehydrogenase and pyruvate dehydrogenase. *The Biochemical journal*, 2002, 769 – 776.
- [10] NIGAM J N. Ethanol production from wheat straw hemicellulose hydrolysate by *Pichia stipitis*. *Journal of Biotechnology*, 2001, 87, pp. 17 – 27.

IMPRESSUM

Verfasser

Universität Innsbruck
Institut für Analytische Chemie u.
Radiochemie

Ortwin Bobleter - Projektleiter
Bernhard Blassing - wiss. Mitarbeiter
Innrain 52a, 6020 Innsbruck
E-Mail: ortwin.bobleter@uibk.ac.at
Web: www.uibk.ac.at/acrc

**Eigentümer, Herausgeber und
Medieninhaber**

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
office@klimafonds.gv.at
www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH