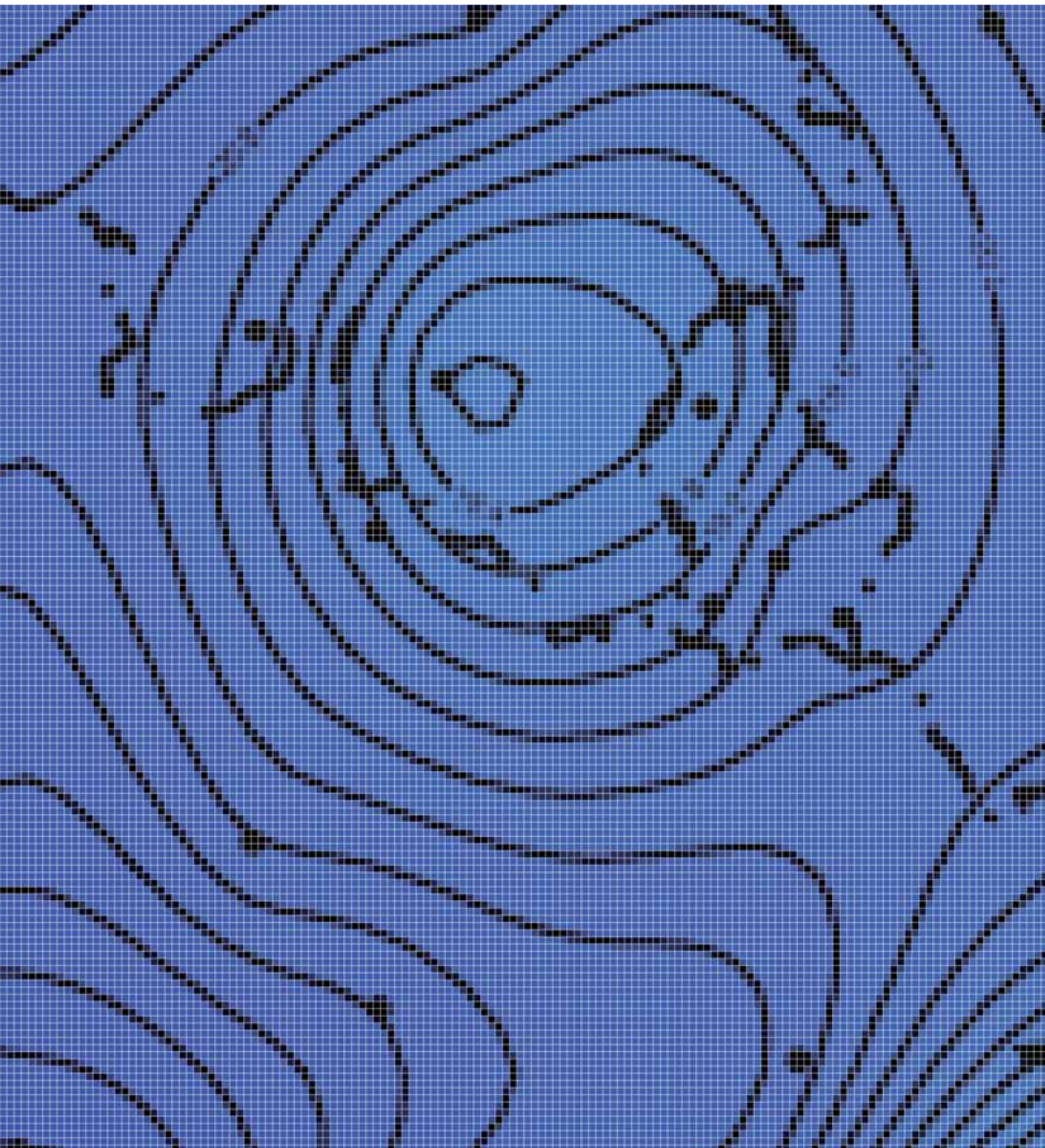


# CAHIER SCIENTIFIQUE REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

CAHIER SCIENTIFIQUE BIANNUEL DE LA REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE 1 | 2012





L'A.L.I.A.I. dans l'origine remonte à 1897, et qui regroupe plusieurs organismes apparentés, édite quatre fois par an la Revue Technique, sa publication principale, dédiée à des articles se rapportant aux sujets traités par les professionnels qu'elle regroupe.

Pour l'ALIAI la Revue Technique Luxembourgeoise et son site Internet sont des moyens de communication essentiels donnant à ses membres le contact immédiat avec l'organisation à laquelle ils sont affiliés.

Ces instruments offrent aux entreprises de présenter leur travail devant un public ciblé. La Revue Technique Luxembourgeoise possède un passé prestigieux qui lui confère une légitimité auprès des affiliés de l'ALIAI.

La Revue Technique Luxembourgeoise et le site Internet offrent aux Partenaires de la Revue Technique de l'Association des Ingénieurs, Architectes et Industriels la possibilité de

faire connaître leurs produits ou d'informer de cette manière sur la structure de leur entreprise et de toucher un public ciblé de lecteurs intéressés.

Le cahier scientifique, a pour mission de promouvoir le développement de la recherche et de la culture scientifique, en contribuant à la diffusion et à la valorisation des connaissances et des méthodes scientifiques en vue de soutenir un dialogue entre la science et la société.

Le cahier scientifique est publié 2 fois par an par la rédaction de la Revue Technique. C'est un instrument professionnel pour scientifiques, techniciens, étudiants et intéressés professionnels dans le domaine de l'ingénierie, de la technologie, de la recherche, des énergies renouvelables et de l'industrie.

Des articles sur des recherches approfondies par nos collaborateurs des instituts, des partenaires ou industriels sont publiés dans chaque exemplaire des cahiers scientifiques.

## REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

[www.revue-technique.lu](http://www.revue-technique.lu)

éditée par

L'Association Luxembourgeoise des Ingénieurs, Architectes et Industriels  
L- 1330 Luxembourg – 6, boulevard Grande-Duchesse Charlotte  
t 45 13 54 f 45 09 32

Rédacteur en Chef Michel Petit  
Responsable Revue Technique Sonja Reichert  
t 26 73 99 s.reichert@revue-technique.lu  
Graphisme Bohumil Kostohryz

## Environmental Research and Innovation, made in Luxembourg

The Resource Centre for Environmental Technologies (CRTE), a common structure of the Public Research Centre Henri Tudor and the Ministry for Sustainable Development and Infrastructures is a major player in public environmental research and innovation in Luxembourg. Created in 1998 with the primary mission of supporting small and medium sized enterprises (SME) with the application of Best Available Techniques (BAT) for the environment and Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) in production processes, it has developed into an interdisciplinary research centre with more than fifty highly skilled scientists and engineers. CRTE develops tools and methods in environmental assessment and modelling, capable of tackling a wide range of socio-economically relevant questions and supports technological developments, mainly in the energy and water sectors, with skills and competences in environmental systems engineering.

As a department of Tudor, CRTE takes up the challenge of contributing to the three-fold mission of a Research and Technology Organisation (RTO): scientific excellence in specific domains, environmental policy support and innovation, both in private and public activity sectors. The Cradle to Cradle (C2C) concept and its application to business sites, as described in a contribution to this "Cahier Scientifique", is a prominent example for the three-fold mission, with the development and testing of sustainable business strategies, in collaboration with companies and policy makers. RTOs play as well an important role in the consolidation and transfer of knowledge, as illustrated by

the case of Dr.-Ing. Katarzyna Golkowska, author of an article on energy production from biomass. After completion of her PhD thesis at the University of Luxembourg, the researcher joined CRTE to work on the valorisation potential of biogenic organic raw materials in North-West Europe.

The merger of the Public Research Centres Henri Tudor and Gabriel Lippmann will be a most important step towards setting the roadmap for environmental research and innovation within the coming years in Luxembourg. It will allow building up more critical mass in terms of competences and infrastructures, aligning and focusing research agendas and thereby gaining even stronger international visibility through scientific excellence in selected domains. It will on the other hand boost collaboration with companies and the University of Luxembourg, e.g. through the Ecoinnovation cluster animated by Luxinnovation, where the valorisation of biowaste in an urban environment has earned a particular attention. The common roadmap should foster the development of a flexible, multidisciplinary research and innovation environment, integrating academic and applied research, with the ability of covering the complete innovation cycle and providing strong environmental policy support. Positioning Luxembourg and the Greater Region in a competitive international research and innovation market asks, furthermore, for a good coordination of public funding schemes and their alignment with national strategies as well as intelligent and farsighted governance of the whole research environment.

Dr. Paul Schosseler

Director of CRTE and member of the executive management board of CRP Henri Tudor

[www.tudor.lu](http://www.tudor.lu)

# \_INDEX

- 6\_ HENRI MULLER  
In memoriam
- 8\_ SENSIBILISATION SUR LE CLOUD COMPUTING EN PME  
Eric Miglioranzo, R&D Engineer
- 12\_ Cradle to Cradle (C2C)  
Alina Belousova
- 16\_ GNSS METEOROLOGY IN LUXEMBOURG  
Furqan Ahmed, Norman Teferle, Richard Bingley, Jörg Bareiss
- 24\_ MONOVERGÄRUNG VON MAISSILAGE UND ZELLULOSE  
Dr.-Ing. Katarzyna Golkowska, Prof. Dr.-Ing. Manfred Greger
- 28\_ THERMODYNAMISCHE ZUSTANDSÄNDERUNGEN REALER GASE  
Dr. Thomas ANDREAS, Leiter F&E, Rotarex
- 36\_ HOLZ IN BESTFORM  
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
- 40\_ Campagnes de production  
Ing. dipl. Henri Muller
- 47\_ RESEARCHERS' DAYS 2012  
Fonds National de la Recherche
- 48\_ WIE VIEL ENERGIE VERBRAUCHEN NEUE UNTERRICHTS- UND BÜROGEBÄUDE IN LUXEMBURG?  
Prof. Dr.-Ing. S.Maas, Ass.-Prof. Dr.-Ing. F.Scholzen, Dr.-Ing. Andreas THEWES, Ass.-Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann
- 54\_ CHERCHEUR DU SNT REÇOIT HARLAN D. MILLS AWARD 2012  
Lionel Briand

\_comité de lecture    Ingénieur dipl. Pierre Dornseiffer  
                                 Représentant membre ALI

                                 Ing. Dipl. Marc Feider  
                                 Administrateur et chef de service Bâtiments / Ouvrages  
                                 Schroeder & Associés

                                 Prof. Dr. Ing. Jean-Régis Hadji-Minaglou  
                                 Université du Luxembourg, Unité de recherche: Ingénierie  
                                 Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication

                                 Informaticien dipl. Patrick Hitzelberger  
                                 Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann Département ISC

                                 Prof. Dr. Ing. Michel Marso  
                                 Professeur en Technologie de Télécommunications  
                                 Université du Luxembourg, Unité de recherche: Ingénierie  
                                 Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication

                                 Dr. Paul Schosseler, Directeur  
                                 CRTE / CRP Henri Tudor



© Bohumil KOSTOHRVZ | boshua

revue publiée par\_



www.ali.lu



www.oai.lu



www.tema.lu



ASSOCIATION LUXEMBOURGEOISE DES  
INGÉNIEURS - ARCHITECTES - INDUSTRIELS  
www.aliai.lu

partenaires de la revue\_



revue imprimée sur du papier\_



Henri Muller naquit le 3 août 1927 à Kleinbettingen dans une famille d'industriels luxembourgeois; Il fréquenta l'école primaire locale, termina ses études secondaires à l'Athénée Grand Ducal à Luxembourg, et obtint en 1952 le diplôme d'ingénieur civil métallurgiste à l'Université de Liège.

In memoriam

## HENRI MULLER\_



Il débuta aussitôt sa carrière à Differdange à la Hadir (Hauts-fourneaux et Aciéries de Differdange, St.-Ingbert et Rumelange). La HADIR était spécialisée dans la fabrication de poutrelle Grey, des poutrelles à larges ailes et à faces parallèles, production introduite par Paul Wurth qui en avait achetée la licence en 1898.

La carrière de Henri Muller fut exemplaire. En 1961, il fut nommé chef de service, puis promu ingénieur en chef de l'usine de Differdange.

Il devint ensuite, en 1976, directeur adjoint de l'Arbed ('Aciéries Réunies de Burbach-Eich-Dudelange) à Esch-Belval, qui avait repris la HADIR en 1967 et qui dominait la production sidérurgique au Grand Duché.

Après un bref retour au bercail, à Differdange, comme directeur, il fut nommé, la même année, le 1er novembre 1976, directeur général adjoint au complexe maritime SIDMAR, en Belgique, dont l'ARBED était l'un des partenaires au moment de sa création, puis plus tard, en devint l'actionnaire principal. C'était pour lui un choix difficile, car il l'obligeait de s'éloigner de son cocon natal, de ses amis, de sa famille; il n'avait pas été le premier pressenti pour ce poste, mais le seul à l'accepter, et il ne le regretta jamais.

En effet, en 1973 survint la première crise du pétrole, son prix étant soudainement multiplié par 4. Ce choc pétrolier déclencha, en 1974, une dernière flambée de la demande d'acier mais la demande s'effondra en 1975. Ce fut, au niveau européen, le temps de la restructuration, orchestrée par le commissaire européen Etienne Davignon, et, au niveau national, le début de la tripartite; un accord de restructuration de la sidérurgie luxembourgeoise fut signé le 19 mars 1979 dans le cadre de la Conférence tripartite.

Henri Muller vit partir à la retraite anticipée plus d'un de ses amis luxembourgeois. Mais Sidmar résista mieux à la crise que les producteurs d'acier traditionnels, étant une aciérie récemment créée, disposant d'une situation maritime avantageuse, et spécialisée dans les produits plats à demande plus forte. René Brück, administrateur délégué, Alphonse Helfen, directeur général et Henri Muller pilotèrent avec succès Sidmar à travers le tumultueux marché de l'acier dans les années 80 et c'est précisément dans ces circonstances difficiles que ce dernier eut l'occasion de déployer tous ses

talents. Il apprit très rapidement le néerlandais, gagna la confiance de ses collaborateurs flamands, et fut à l'écoute du personnel néerlandophone.

Lors de la suppression du moratoire, Sidmar entreprit une nouvelle vague d'investissements, propulsant l'entreprise à la pointe technologique parmi les producteurs d'acier plat.

À sa création en 1962, les grands producteurs d'acier européens avaient convenu que l'entreprise aurait le statut d'aciérie maritime, et ils visaient surtout l'exportation des produits en dehors de l'Europe.

Mais, dans les années 80, l'automobile devenait un marché important pour les producteurs d'acier.

L'Europe ayant une industrie automobile florissante, il devint évident que Sidmar devait créer son propre service de vente, afin de conquérir sa part sur le marché européen.

C'est pour cela aussi que l'intérêt fut dirigé sur la production d'acier galvanisé; Henri Muller en comprit très vite l'importance et pris rapidement des mesures pour pallier au manque de capacités de galvanisation à Sidmar.

Comme les accords de Hanzinelle signés avec les autres industriels Belges de l'acier interdisaient à SIDMAR de construire ce genre d'installation pendant 10 ans, on décida de conclure un accord de participation avec un partenaire, en créant le groupe «SEGAL», à Ivoz-Ramet.

Sidmar acquit à partir de 1983, 1/3 des capacités, ayant comme partenaires Cockeril-Sambre et les Hauts Fourneaux de IJmuiden. La volonté de maximiser la production aboutit entre 1991 et 1992 à la construction d'une ligne de galvanisation électrolytique à Genk «SIKEL», en joint venture avec Klöckner Stahl Bremen, actuellement Arcelor Mittal Bremen. Dans la salle de réunion du comité des directeurs pend un poster intitulé «Men of Mathematics», datant de la période où Henri Muller dirigeait l'entreprise.

En effet, Henri Muller n'était pas seulement un ingénieur, c'était aussi un passionné des mathématiques; L'une de ses réalisations les plus remarquables à cet égard, et dont il était le plus fier, était «l'IPSO» ou «Integrated Production Scheduling Organisation», basé sur un modèle théorique de gestion intégrée de la production aboutissant à un échéancier programmable performant.

Il avait publié ses réflexions en 2003 dans un des Cahiers de Gestion du Centre Universitaire de Luxembourg; Son modèle est toujours en usage à Sidmar en 2012 et comme l'a souligné le regretté Norbert von Kunitzki dans sa préface de la publication précitée: «l'analyse d'Henri Muller ... a été pendant une décennie, un des facteurs déterminant la gestion de SIDMAR, dont la production... est montée de 3 à 5 millions de tonnes d'acier pendant cette période».

Une autre de ses passions était les langues; il attachait beaucoup d'importance à ce que les documents rédigés en néerlandais et en français que les responsables préparaient pour les conseils d'administration le soient dans un style correct et soigné.

Lui-même lisait énormément et aimait écrire des textes scientifiques sur des sujets divers qui le passionnaient; dans ses écrits, il veilla particulièrement à un langage clair et précis.

Il est curieux que l'un des derniers textes que cet homme rigoureux ait transmis à sa famille n'avait rien de scientifique: Il s'agissait d'une description aux notes presque spirituelles et d'une étonnante qualité littéraire, de ce qu'il avait ressenti au cours d'une intervention ophtalmique sous anesthésie.

Henri Muller, ancien directeur général de Sidmar à Gand, aujourd'hui Arcelor Mittal, s'est éteint le 25 février 2012 à Opglabbeek en Belgique, entouré de ses proches.

Ses collaborateurs gardent de lui le souvenir d'un homme sévère mais intègre et équitable, un homme à l'esprit infatigable et extrêmement rigoureux dans ses actes et dans ses pensées.

Ceux qui l'ont connu dans sa vie privée se souviennent aussi d'un homme pratiquant un certain sens de l'humour et capable d'autodérision, un féru des discussions polémiques, un homme d'une grande culture, généreux et d'une sensibilité à fleur de peau qu'il s'efforça de toujours masquer.

En hommage à une personnalité chatoyante.

Marie-Louise Muller Verplanken

Le concept «cloud computing» n'est effectivement pas seulement une offre d'externalisation de services. Le cloud computing propose un modèle original de fournitures de services IT qui s'inscrit dans une logique d'externalisation du système d'information. L'entreprise accède, à sa guise et le temps désiré, aux ressources et services mis à sa disposition, et sera facturé en conséquence. Qu'il s'agisse de services d'hébergement, de fourniture d'infrastructures à distance, de la fédération de services applicatifs à la demande, le «cloud computing» est un concept qui offre une nouvelle façon de concevoir et de consommer l'informatique.



Le cloud computing, un concept original de fourniture de services

## SENSIBILISATION SUR LE CLOUD COMPUTING EN PME\_

Eric Miglioranzo, R&D Engineer

Comme le grand principe du cloud computing est de reprendre toutes les modèles d'externalisations (mode hébergé, accès en réseau, mutualisation, usage à la demande, services associés), il englobe donc toutes les ressources IT. Ainsi, quand une offre SaaS ne concerne qu'un logiciel, le concept «cloud computing» permet de fédérer l'accès à plusieurs services et à plusieurs logiciels SaaS, lesquels peuvent être regroupés en "bouquets" de services applicatifs. Par cet exemple, il s'agit bien de souligner que le SaaS est une solution logicielle, alors que le cloud, lui, est une stratégie.

<http://www.cegid.fr/le-cloud-computing1-definitions-et-approches/r1-3464.aspx>

***Mais comme pour la plupart des concepts, sensibiliser les décideurs de PME et TPE aux enjeux du cloud computing est tâche d'autant plus ardue que leur quotidien consiste à imaginer des solutions concrètes à leurs préoccupations.***

### **Sensibilisation et stratégie d'innovation de services par le cloud**

Evolution des métiers, évolution des vigilances

Grâce à l'apport des TIC, l'entreprise gère plus facilement la multiplicité de ses unités, de ses sites, voire de ses pays. Ses relations d'affaires sont facilitées, ses échanges de données avec ses partenaires se multiplient, et le nomadisme de ses commerciaux est favorisé.

En contrepartie, il convient d'être vigilant et donc de suivre l'évolution des comportements inhérente aux nouvelles opportunités de travail, comme par exemple:

- \_Le nomadisme impose à l'information d'être accessible depuis tout type d'outil mobile;
- \_Les contraintes réglementaires de contexte (par ex celui des PSF) auxquelles l'entreprise doit satisfaire sont sujets à une réflexion approfondie pour envisager toute initiative d'externalisation de services ou de données aux fournisseurs de services Cloud;
- \_Le poids croissant au fil des années des données, de la multiplication des stockages souligne l'importance d'un plan d'anticipation.

Ces quelques exemples pour montrer que l'entreprise se doit d'être attentive et vigilante pour anticiper la mise en

œuvre des exigences requises aux évolutions métiers qu'elle considère comme incontournables pour consolider son positionnement marché et sa notoriété.

### **Le Cloud ouvre le chemin de l'innovation aux PME**

Le Cloud Computing est un vecteur d'ouverture aux évolutions. Et pour chaque entreprise qui y souscrit, l'enjeu du Cloud Computing ne doit pas être uniquement, comme dans toute stratégie d'externalisation, comme une solution qui vise à réduire les coûts. Certes, les économies sont facilement et rapidement mesurables. Ne serait-ce que parce que les services Cloud souscrits permettent de minimiser l'investissement des entreprises en propre matériel, logiciels, licences et en maintenance. Un autre intérêt non négligeable concerne la mise à niveau d'un environnement de qualité supérieure.

Mais le Cloud, peut-être, est une opportunité pour les entreprises qui cherchent à assurer leur survie sur le long terme grâce à l'innovation. Cette approche donne aux PME les moyens ainsi que la possibilité d'innover en offrant un accès rapide aux services technologiques externalisés en même temps que la réduction des dépenses financières. .

Ne pas innover est source de recul dans la compétition que le marché anime. Et bien des entrepreneurs soulignent particulièrement l'importance d'innover pendant une crise pour assurer le succès à long terme. «Les entreprises qui continuent d'innover pendant une récession se seront adaptées et mieux préparées lorsque le marché reprend à nouveau.»

### **Que faut-il externaliser, et pour quels bénéfices?**

Mais, externaliser tout ou partie d'une application métier, d'une infrastructure, ou d'une plate-forme impose de considérer précautionneusement chacune des évolutions opérées sur les processus concernés. Les évolutions sont importantes pour chacun des acteurs impactés directement ou indirectement. Et les bénéfices attendus relèvent effectivement de l'amélioration de l'efficacité en termes de productivité administrative, de réactivité, de rapidité de décision, mais surtout en termes d'amélioration de l'accès aux données. De plus, il est démontré que les caractéristiques des services Cloud internalisés et l'adaptation individuelle influencent significativement la satisfaction, l'utilisation et



la formation de perceptions positives. Disposer d'une stratégie d'adaptation favorise l'adoption de ces nouveaux services au sein de l'entreprise.

Toutefois, dans certains cas, le Cloud n'est pas source de création de valeur. Par exemple, reconsidérer tout ou partie de son infrastructure informatique, surtout quand elle est conséquente, pour évoluer vers le Cloud Computing n'aidera pas forcément l'entreprise, hormis s'il est nécessaire de régénérer complètement, le portefeuille d'applications.

De fait, quelles que soient les opportunités Cloud susceptibles de favoriser l'entreprise, élaborer sa stratégie d'innovation de services par le Cloud, permettrait d'aborder plus largement l'apport de solutions Cloud, en permettant aux utilisateurs finaux de s'approprier les évolutions qui constitueront le plan d'innovation de services par le Cloud.

### **Sensibilisation et Stratégie d'innovation de services par le cloud**

Bien des études confirment, que «les problèmes majeurs d'hébergement d'un entrepôt de données dans les nuages est le manque de confiance accordée aux fournisseurs du cloud computing, de disponibilité de service et de sécurité de transfert des données vers le cloud computing» .

Le thème de la sécurité autour des offres de Cloud Computing est de loin la préoccupation la plus importante des décideurs en entreprises en considération des sujets d'inquiétude suivant:

\_Sécurité/Confidentialité

\_Dépendance du réseau / facteurs liés au réseau

\_Perte de contrôle sur les données/Externalisation vers un tiers

Le Cloud Computing oblige donc à repenser la sécurité informatique, et nécessite qu'une démarche spécifique s'attendant à ces freins soient menées pour les désinhiber, potentiellement au travers d'une sensibilisation des décideurs à l'intérêt de considérer leurs plus grandes réticences comme des opportunités d'innovation:

#### **1. Evolution de la technologie**

Une des trois grandes réticences des décideurs est de ne pas maîtriser l'évolution de la technologie. Mais le Cloud est un

facteur intéressant à plusieurs titres : le niveau technologique de l'entreprise peut être déployé tactiquement à moindre coût pour répondre à l'évolution des besoins de l'entreprise et pour soutenir l'innovation en permettant un développement rapide de nouveaux produits et services, grâce à un nombre croissant de fournisseurs de technologie qui adoptent le modèle du cloud computing. Le réseau n'a jamais été aussi important comme catalyseur pour l'innovation.

#### **2. Le manque de maîtrise de la demande clients**

La réticence envers les prestataires de services est un thème récurrent : comment envisager ces nouvelles opportunités intentées par des fournisseurs de services éloquentes mais jugés peu réactifs à l'expression des besoins ou des préoccupations ? Pourtant, il est très important de réaliser que ces services sont hautement standardisés afin de concerner le plus grand nombre d'entreprises. Or une pratique courante de l'entreprise, notamment lors de l'adoption de progiciel, est de développer des spécificités afin de répondre au mieux aux besoins des métiers. Par exemple, avec le SaaS, cette pratique détruira ses principaux avantages en faisant exploser les coûts, les délais et la robustesse des services. Ce qui explique que la sélection du fournisseur de services Cloud Computing se fait prioritairement sur son expertise ressentie ou reconnue sur la solution à déployer, les coûts, et s'il est déjà présent ou non au sein de la société.

#### **3. La perplexité à adopter une stratégie**

Elaborer sa stratégie d'innovation par le Cloud est l'objet d'une démarche peu coutumière en PME, mais qui apporterait une démarche structurante, un préalable objectif à l'engagement pour internaliser l'externalisation.

En effet, les réticences précitées deviennent alors des facteurs importants de motivation pour qu'une entreprise envisage l'innovation de services par les TICS et engage une réflexion approfondie, personnalisée et pragmatique sur l'intérêt du Cloud dans son organisation.

Il y a un intérêt à mieux informer, mieux promouvoir les nouveaux modèles supportés par les fournisseurs de services, et mieux disséminer sur l'importance et de l'impact de l'innovation de service par le Cloud en PME.

Aussi, décider d'évoluer vers le Cloud relève d'une décision de la direction, qui s'inscrit dans le cadre d'une stratégie globale de l'entreprise, et pour laquelle le plan d'actions prend en considération, outre les aspects technologiques, l'impact sur l'organisation et ses processus, et l'accompagnement des acteurs concernés en vue d'évaluer la satisfaction produite. <http://www.cegid.fr/e-cloud-computing1-definitions-et-approches/r1-3464.aspx>

### Suggestions

Pour suggestion, deux des initiatives pressenties en matière d'accompagnement à l'intégration de services externalisés en PME consistent à :

- \_ Produire une analyse contextuelle sur le territoire national en vue d'élaborer un plan de sensibilisation adapté
- \_ Elaborer une démarche d'élaboration d'un plan d'innovation de services par l'externalisation (Voire envisager une approche basée sur un livre rédigé pour accélérer l'innovation de service par la mise en œuvre dans l'infrastructure de capteurs Cloud pour accéder à des ressources et des capteurs pour disposer de services cloud computing. Ainsi le fournisseur de services prépare des modèles de service et les demandeurs de service peuvent rapidement disposer des instances de service lorsqu'ils ont besoin. Les demandeurs de service peuvent utiliser des instances de service eux-mêmes ou d'étendre les instances de service pour la création de nouveaux services et de nouveaux modèles de service. L'innovation de service et ses scénarios d'utilisation.)

Cela justifie qu'instancier une démarche d'innovation de services par les TIC est une opportunité pour l'entreprise d'appréhender une réflexion approfondie aux opportunités de services innovants supportés par les technologies de l'information et des télécommunications.

Accompagnée et inscrite dans une démarche collaborative, l'entreprise édifie sa stratégie à moyen terme en construisant notamment son plan d'évolution de son système d'information. Mais pour aborder tous les aspects fonctionnels, organisationnels mais aussi technologiques, il est indispensable, au préalable des réflexions qu'une base de connaissances, des tendances et des perspectives d'innovation, soit constituée et partagée avec les acteurs impliqués. Et le Cloud doit

être un concept entendu, compris et considéré au titre d'un des scénarios qui contribue à simplifier le fonctionnement de l'entreprise, à lui permettre de se concentrer sur son cœur de métier, et à améliorer sa capacité d'innovation.

### Le Cloud computing, garant de la bonne protection de l'information

#### Disponibilité, intégrité, confidentialité

Mettre en œuvre des solutions de CLOUD au sein de l'entreprise, c'est instancier dans les processus de traitement de l'information des pratiques adaptées au contexte de l'entreprise et à son organisation qui garantissent la mise à disposition des données non altérées aux personnes autorisées : disponibilité, intégrité, confidentialité.

Mais, le Cloud présente un double facteur de risque supplémentaire parce qu'il s'agit d'externaliser ses services et son information auprès de fournisseurs externes. Ces deux points requièrent une vigilance accrue pour que soient assurés l'intégrité et la confidentialité des informations, la disponibilité des données et des services, et l'établissement de la conformité à une politique ou réglementation. Or à ce jour, toutes les préoccupations de sécurité n'ont pas encore été soumises aux fournisseurs de services Clouds.

#### Intégrer l'externalisation en entreprise

Pour compléter l'expression des vigilances, il faut avoir conscience qu'une des problématiques importante d'entreprise est l'intégration de nouveaux services dans les systèmes d'information existants. Paradoxalement, externaliser devient alors une démarche d'intégration qui ne se fait pas aussi facilement qu'il y paraît car il faut, en effet, construire une couche intermédiaire pour faire l'intégration de qui était déjà intégré. Si la tendance d'aujourd'hui préconise l'utilisation des «Web Services» pour faire ces intégrations, il n'en reste pas moins qu'une telle démarche est source de préoccupations comportementales basée sur la désappropriation technologique et organisationnelle. Les principales préoccupations sont intrinsèquement liées à l'exploitation des services fournis par d'autres organisations et d'y accéder via Internet.

#### L'entreprise a besoin de travailler en confiance

De fait, la notion de confiance est une valeur importante à considérer pour chacun des acteurs intervenants à une

externalisation qui se doit d'être impérativement réussie. «C'est un peu comme devoir laisser son enfant à la crèche, chaque matin, il faut avoir confiance en la structure d'accueil pour passer une journée concentré sur ses activités métier».

Parce qu'en PME les ressources sont limitées, il est très important que le fournisseur de services Cloud fournisse efficacement ses ressources, ce qui par voie de conséquence, souligne la haute importance de construire un modèle de confiance suffisant pour la prédiction de la performance et la stabilité du service..

### Le Cloud sécurisé en PME ne s'improvise pas

Les recommandations ci-après, et qui reflètent les bonnes pratiques générales en matière de sécurisation des Clouds, sont, comme, soulignées par ses auteurs: «elles ne doivent pas être vues comme une garantie de réussite. ...». Il convient donc de déterminer la meilleure approche à adopter en rapport aux besoins spécifiques de l'environnement de l'entreprise. De façon générique, mettre en place et maintenir un programme de sécurisation c'est:

- \_construire et maintenir une infrastructure Cloud sécurisée;
- \_assurer la protection des données confidentielles;
- \_mettre en œuvre une gestion solide des accès et des identités;
- \_assurer le provisionnement des applications et de l'environnement;
- \_mettre en place un programme de gouvernance et de gestion des audits;
- \_mettre en place un programme de gestion des vulnérabilités informatiques et des intrusions;
- \_tester et valider régulièrement l'environnement.

Basé sur [http://www-935.ibm.com/services/fr/gts/pdf/cloud\\_security\\_guidance\\_REDP4614-frfr.pdf](http://www-935.ibm.com/services/fr/gts/pdf/cloud_security_guidance_REDP4614-frfr.pdf)

### Evolution de la fonction RI

Un plan d'actions qui en dit long sur les compétences et les disponibilités des ressources internes et externes nécessaires. Les évolutions de compétences des forces présentes en entreprises sont assez conséquentes et parfois peuvent être fatales. En effet, si les grandes entreprises possèdent

souvent une équipe dédiée à la gouvernance de leur système d'information, les petites et moyennes entreprises disposent, au mieux, d'un responsable informatique dont l'activité est régentée par les priorités technico-informatiques. L'impact sur les fonctions internes est assez important pour les acteurs des petites structures. L'évolution de la fonction de responsable informatique en PME peut être conséquente, et de fait se doit d'être évalué au préalable.

*La démarche de la mise en œuvre en toute sécurité de services Cloud ne s'improvise pas*

### BIBLIOGRAPHIE

- Ashford, W. (2008). Cloud clears the way for SME innovation. *Computer Weekly*, 00104787
- Bordeaux, C., Cleuziou, R. G., Labroche, N., & Lebbah, M. (2012). 9ème Atelier sur la Fouille de Données Complexes Complexité liée aux données multiples et massives. *Noûs*.
- Buecker, A., & Moss, H. (2009). *Redpaper. Computing*, 1-22
- Chang, W. Y., Abu-Amara, H., & Sanford, J. F. (2010). Transforming Enterprise Cloud Services. *Media* (pp. 385-415). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-90-481-9846-7
- Computing, C. (2010). *Cloud Computing*.
- Elie-Dit-Cosaque, C. (2011). Caractéristiques et succès des TI: l'influence de l'adaptation individuelle Référence : (p. 11). 16e Colloque AIM-Saint-Denis (La Réunion).
- Geczy, P., Izumi, N., & Hasida, K. (2012). Cloudsourcing: Managing Cloud Adoption. *Global Journal of Business Research*, 6(2), 57-70. AIST. Retrieved from <http://www.theibfr.com/gjbr.htm>
- Kim, H., Lee, H., Kim, W., & Kim, Y. (2010). A Trust Evaluation Model for QoS Guarantee in Cloud Systems \*. *Distributed Computing*, 3(1), 1-11
- Kloch, C., Petersen, E. B., & Madsen, O. B. (2011). Cloud Based Infrastructure, the New Business Possibilities and Barriers. *Wireless Personal Communications*, 58(1), 17-30. doi: 10.1007/s11277-011-0286-7
- Mongan, K. (2011). The storm is coming. *Accountancy Ireland*, 43(3), 58-60.
- Poujol, M. (2010). *Le Cloud Computing en France. Livre blanc*, 19
- Yuriyama, M.; Kushida, T.; Itakura, M. ., & IBM Res. - Tokyo, Yamato, J. (n.d.). A New Model of Accelerating Service Innovation with Sensor-Cloud Infrastructure (978-0-7695 ed., pp. 308 - 314). San Jose, CA: 978-1-61284-415-2. Retrieved from [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=5958101](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5958101)

Cradle to Cradle (C2C) is an innovation platform for designing beneficial economic, social and environmental features into products, process and systems, starting by determining the intended benefits of a product or service rather than minimizing negative environmental impacts<sup>1</sup>. It was originally developed by the German chemist and former Greenpeace activist Michael Braungart and the American architect William McDonough back in the 1990s in "The Hannover Principles"<sup>2</sup>, going mainstream with the publication of the article "The NEXT industrial revolution"<sup>3</sup>. Cradle to Cradle - the book - was published in 2002<sup>4</sup> on a recyclable polymer to bring home the point that books don't have to come from trees.



## CRADLE TO CRADLE (C2C)\_

Alina Belousova

The concept generated considerable interest in the Netherlands after the documentary "Waste=Food"<sup>5</sup> by director Rob van Hattum was shown on Dutch television. A number of C2C inspired projects and initiatives quickly sprang up across the country, from traditional manufacturing companies beginning to develop C2C products, to C2C buildings, C2C cities and C2C education in universities.

However, despite the growing popularity of the concept, it has been, so far, mostly limited to products, less complex, for which C2C certification has been developed. Progress towards C2C in architecture is ongoing, but, despite some early examples, C2C application on business sites can still be considered uncharted territory. In this context, a European collaboration platform was formed in several countries in North West Europe to apply C2C on the level of business sites, as well as spread the benefits to countries where the idea is not as established as in the Netherlands. Several key Luxembourgish actors involved in the project will be at the vanguard of applying the C2C philosophy in Luxembourg.

### What is Cradle to Cradle?

Conventional products are designed to be thrown away at the end of their use, the so-called "cradle to grave". Recycling comes in only as an afterthought, as a way of dealing with "waste", a product that no longer has value.

A traditional product contains hundreds of different materials all mixed together, often impossible to identify or separate. The materials recovered from such a product are mostly of poor quality, and have therefore limited use for recycling. They can only be used to make lower quality products (for example turning mixed plastics from packaging into park benches), instead of the same type of product. The quality is degrading throughout the chain, until finally the material cannot be recycled anymore, a process commonly termed downcycling.

Meanwhile, the same natural resources thrown away as waste are being depleted, while toxic chemicals are present in everyday products and houses. Cradle to cradle design means that a product should be non-toxic or beneficial to humans and ecosystems during as well as after their use, with materials that can be separated, and completely and safely biodegraded or recycled.

### Waste = food

In natural systems, waste does not exist. The waste of one organism constitutes food for another, forming a continuous cycle of nutrients, in a biological process that contributes to the overall health of the ecosystem. Similarly, we can imagine and create a technical nutrient cycle, where synthetic "nutrients" circulate in a closed loop system, being recovered and reused at the same level of quality at the end of the product's life.



Nutrient Cycles. Source: EPEA Internationale Umweltforschung GmbH.

In order to make that possible, products need to be designed specifically for the biological or technical cycle, with all ingredients in the product well defined, safe for people and the environment, as well as enabling the product to be disassembled and its materials recovered and fed back into the technical cycle.

### Use current solar income

Despite its name, this principle involves using energy coming from the many forms of renewable energy that are all directly or indirectly derived from the sun. "Current", in this case, means rapidly renewable energy, as opposed to fossil fuels or nuclear power. This might include solar power, wind, geothermal or biomass, for example, depending on the local circumstances.

Energy-wise, the aspiration of any C2C process should be to produce more energy that it uses. Energy efficiency measures, when implemented in combination with innovative renewable energy production and distribution can be an effective tool towards that goal.

**Celebrate diversity**

Diversity makes ecosystems more responsive and resilient in changing conditions. In C2C, the concept of diversity is commonly described as a combination of three components – biodiversity, conceptual diversity and cultural diversity.

Biodiversity, in the classical sense, consists in an abundance and diversity of plant and animal species. A C2C project should contribute to enhance the natural diversity of the local environment, be it through, for example, the introduction of plants that will improve indoor air quality, a green roof that will provide habitat for indigenous species, or a constructed wetlands that treat water and enhance the ecological quality of an area.

Conceptual and cultural diversity entail being mindful of a variety of concepts, uses and cultures, adapting to the local environment, using local materials when designing any process that will support human activity (be it a product, a building or a business site), enhancing the adaptability and resilience of the design.

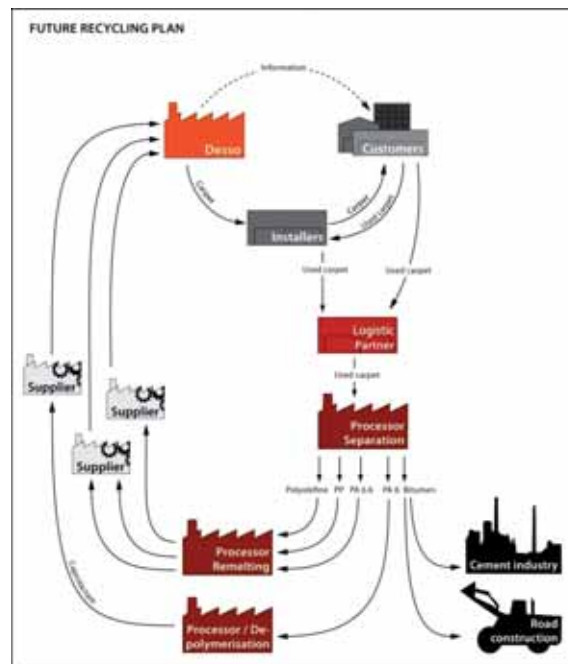
**Beyond sustainability**

Cradle to cradle tries to differentiate itself from traditional sustainability. C2C developers are often affirming that C2C is not about sustainability, but about quality and innovation, a product that is unsafe for humans and the environment is simply a poorly designed one. According to this view, traditional sustainability is only focused on minimizing impacts and increasing efficiency. The paradox of efficiency is that any increases in efficiency will be outpaced by the increase of consumption<sup>6</sup>. Furthermore, minimizing the toxic content of products will make it more difficult to recover that material from the product after its use.

C2C proposes the alternative model of eco-effectiveness, inspired by the abundance of nature. Instead of aiming to minimize the negative impact of human activity, we should aim to maximize the positive impact of our presence on our surrounding environment. Instead of reducing industrial emissions, we want factories whose operating process are purifies the water it uses, releasing it cleaner than it originally was.

Traditional sustainability, the authors claim, is therefore a form of “guilt management”, focusing on minimization and the cost of environmental measures, which ultimately sends the consumer the message that not buying the product is the most “environmentally friendly” option. The C2C model, on the other hand, sees quality improvement as a benefit, one that brings financial rewards and invites the costumer to maximize positive environmental impact by using C2C products.

The revolutionary idea of C2C is that economic growth and business can be a constructive force, and, conversely, that C2C earns money and makes business sense. Desso, a carpet manufacturer, has begun making C2C carpets that can be completely recycled, don’t offgas toxic chemicals like regular carpets and clean indoor air. Its profitability greatly increased since it became C2C certified, and the company went from being considered an “old-fashioned” company to being on the cutting edge of innovation.



Desso recycling system. Source: Desso BV

Another example of a C2C product is Steelcase's "Think" chair, which was designed to be disassembled in five minutes and is 98% recyclable, as well as being designed with safe materials for good indoor air quality.



Steelcase Think Chair. Source: EPEA Internationale Umweltforschung GmbH

Taking another example from nature, a C2C building should behave like a tree. It should provide a healthy, enjoyable environment for its occupants, quality materials, biodiversity, clean air and water, and produce its own energy. It should also be completely deconstructable and recyclable at the end of its life.



Bionorica head office Neumarkt. Source: Bionorica

Although a completely C2C building does not yet exist, some examples of C2C implementation in architecture already exist. One such example is the Bionorica head office building in Neumarkt. It was designed, with the collaboration of Michael Braungart, to have a positive impact on people and nature. The building is energy positive, building materials and furnishing were selected for their health and environmental safety, and a recovery guarantee was negotiated for its non-recyclable materials<sup>7</sup>.

#### C2C BIZZ Interreg IVB project

In the INTERREG IVB Project C2C BIZZ (Cradle to Cradle in business sites), 10 Northwestern European partners are, since 2011, working together with the objective of enhancing the implementation of C2C on new and existing business sites. Participating partners include governmental agencies, knowledge institutions and private companies from six European countries (Netherlands, UK, Belgium, France, Germany and Luxembourg).

In the 4 years of the project, several pilot sites in the partnership will be developed or reconverted according to C2C principles. On each site, different aspects of the transition towards C2C will be developed and tested. The project will count with the direct involvement of EPEA (Environmental Protection and Encouragement Agency), C2C's developer founded by Michael Braungart, to ensure that the project's output is in accordance to the C2C philosophy.

In the Sustainable Industries Park in London material loops will be closed, by setting up a material database and enhancing the exchange of materials between companies. At Ecoparc Windhof, one of the Luxembourg partners, sustainable energy will be generated for the whole business site. In the Lille metropolitan area, the former industrial site La Lainière will be revitalized with attention to the different forms of diversity.

#### Luxembourgish Participation

Three national institutions are participating in C2C BIZZ represent distinct and complementary sectors of Luxembourg society, bringing together its very diverse interests into a fruitful collaboration. The Ministry of Sustainable Development and Infrastructure (MDDI-Ministère du Développement durable et des Infrastructures) represents the govern-

mental perspective, Ecoparc Windhof the business angle, while the Resource Centre for Environmental Technologies (CRTE – Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement) the scientific position.

The Luxembourg pilot site, located in Windhof, will have renewable energy as its main focus within the project. The goal will be to produce an energy generation protocol for the site that can be applied to any business site in order to assess and develop the site's renewable energy potential. Additionally, a demonstration facility of continuous material loops will be built on the site, matching the material flows of different companies.

Solarwind, Ecoparc's flagship building currently in construction, will integrate a variety of renewable energies that include solar photovoltaic, solar thermal, wind, geothermal, and biomass in a best-practice office building. The idea is to showcase the "4Ps" concept: People, Planet, Profit, and Pedagogy, i.e. it supports occupants' well-being, protects the planet, creates return on investment, and offers educational tools. The building is also designed to reduce CO<sub>2</sub> emissions from traffic congestion, as over 80% of tenants will be cross-border.

In the C2C BIZZ project, MDDI will mainly be involved in developing a C2C manual which describes planning, realization and management of a C2C industrial area (best practices). This should give concrete guidelines to users how to realize harmonious planning, careful realization and management of industrial areas. The ambition is develop a set of C2C criteria that can be useable by governmental bodies and site management organizations as a tool for spatial planning and the sustainable development of territory.

CRTE, with its expertise in environmental assessment, management and policy support, will contribute to the researches on continuous loops and energy and support the local partners in Luxembourg with their demonstration projects. In particular, the CRTE will try to bring together the concepts already tested in industrial ecology and the continuous loop approach and energy solutions of the C2C concept.

We have only begun to unlock the innovation potential of Cradle to Cradle. A series of national events and activities will be planned in Luxembourg within the project frame-



work. These will be open to the general public as well as specific target audiences like businesses or public officials. This project has received European Regional Development Funding through INTERREG IV B.

[www.c2cbizz.com](http://www.c2cbizz.com)  
[www.tudor.lu](http://www.tudor.lu)

#### References

- 1\_ M. Braungart and D. Mulhall. (2010). *Cradle to Cradle Criteria for the Built Environment*.
- 2\_ W. McDonough, et al., *The Hannover Principles: Design for Sustainability*: WMD Architects, 2003
- 3\_ W. McDonough and M. Braungart. (October 1998) *The NEXT Industrial Revolution*. *The Atlantic Monthly*. 82-92. Available: <http://www.theatlantic.com/magazine/toc/1998/10>
- 4\_ W. McDonough and M. Braungart, *Cradle to cradle : remaking the way we make things*. New York: North Point Press, 2002.
- 5\_ R. v. Hattum, "Waste=Food," in *Tegenlicht/Backlight*, ed. The Netherlands: VPRO, 2006
- 6\_ J. Polimeni, et al., *The Jevons Paradox and the Myth of Resource Efficiency Improvements* Earthscan, 2007
- 7\_ W. Debacker, et al., "Sustainable building, materials use and Cradle to Cradle. A survey of current project practices," Mechelen 2011

Solarwind building plan.  
Source: Ecoparc Windhof GIE

Atmospheric water vapour is a primary greenhouse gas and plays an important role in weather forecasting and climate monitoring. Global Navigation Satellite System (GNSS) signals experience a propagation delay, which is related to the amount of water vapour in the lower atmosphere. Hence GNSS observations can be processed to estimate this delay with millimetre-level accuracy and together with meteorological data can be used to compute the amount of atmospheric water vapour on various temporal and spatial scales.



## GNSS METEOROLOGY IN LUXEMBOURG\_

Furqan Ahmed, Norman Teferle, Richard Bingley, Jörg Bareiss

The term Global Navigation Satellite Systems (GNSS) refers to a number of systems having a satellite constellation used to provide position, navigation and timing data. The Global Positioning System (GPS) of the US, the GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) of Russia, Galileo of Europe and the Compass/BeiDou Navigation Satellite System (CNSS) of China are examples of such GNSS. As of now, only GPS and GLONASS are fully operational. A GNSS consists of three segments namely the space segment, the ground segment and the user segment. The space segment comprises of satellites distributed in various orbits, the ground segment is composed of a number of globally distributed control stations and the user segment contains the GNSS receivers which can be ground-based, airborne or space-borne depending on the user application (Hofmann-Wellenhof et al., 2007). Today, GNSS dominate the fields of positioning, navigation and timing, and have a wide range of applications including those in engineering, geosciences and meteorology.

The term "GNSS meteorology" refers to the concept of assimilating GNSS derived information about the state of the atmosphere into Numerical Weather Models (NWM) for weather forecasting. As compared to conventional meteorological sensors, GNSS has some benefits such as higher temporal and spatial resolutions, all weather operation capability, lower cost, and often freely available data from national to worldwide networks of stations. All these characteristics make GNSS an efficient tool to detect and track extreme short-term weather events (Iwabuchi et al., 2009).

Since the onset of GNSS many networks of continuously operating GNSS stations have been established for engineering and scientific purposes and often the organizations owning and maintaining these, so called, GNSS reference networks, provide their observation data free of charge for research. In Luxembourg and the Greater Region these organizations are the Administration du cadastre et de la topographie and the Service public de Wallonie (WALCORS), respectively, and both provide their service mainly for engineering and surveying purposes. For scientific applications the community has formed research organizations which collect GNSS data and provide related services on an international to global basis.

These include the International GNSS Service (IGS) (Dow et al., 2009) and the Reference Frame Sub Commission for Europe (EUREF) (Bruyninx et al., 2008).

Over the last decade, various research projects investigating the use of GNSS-derived water vapour estimates for meteorology have been conducted and some of them are still in progress. The European Cooperation in Science and Technology (COST) funded the "COST Action 716: Exploitation of ground-based GPS for climate and numerical weather prediction applications" from 1999 to 2004 (Elgered, 2001). Another project "Targeting Optimal Use of GPS Humidity measurements in meteorology (TOUGH)" was conducted in Europe from 2003 to 2006 (Huang et al., 2003). Currently, the EUMETNET EIG GNSS water vapour programme (E-GVAP) is a series of research projects since 2005 to study the use of near real-time (NRT) GNSS data for numerical weather prediction (<http://egvap.dmi.dk>). Analysis centres located all over Europe submit NRT GNSS-derived delay estimates to E-GVAP for validation, monitoring and research.

The developments from these projects lead to a rapid growth of GNSS meteorology and a number of European meteorological institutes continue to foster this technique. Météo France (Moll et al., 2008) and the UK MetOffice (Bennett et al., 2008) are currently using products from NRT GNSS processing systems in their global, regional and local NWM. The Danish Meteorological Institute (<http://www.dmi.dk>), the Royal Dutch Meteorological Institute (<http://www.knmi.nl>) and Royal Observatory Belgium (<http://www.gnss.be>) are some other organizations with a current research emphasis on GNSS meteorology.

Besides GNSS meteorology's use in operational weather forecasts other benefits arise from its application in climatology. As atmospheric water vapour is the primary greenhouse gas, changes in it as monitored by GNSS can provide important information for the study of climate variations (Nilsson et al., 2008, Stende, 2006). By analysing historical time series of GNSS-derived atmospheric water over longer time periods, variations in climate can be monitored on annual to decadal time scales. With sufficient length in these GNSS-derived meteorological products, important predic-



tions of the future climate will become possible which, in turn, can have consequences for the specifications of structures and other engineering projects.

In this article, we provide an overview and some preliminary results of the research project "The Potential of Precipitable Water Vapour Measurements using Global Navigation Satellite Systems in Luxembourg (PWVLUX)" which is funded by the Fonds National de la Recherche (FNR) Luxembourg and aims at studying the potential for the use of GNSS in operational meteorology and climatology in Luxembourg and the Greater Region.

### Estimating Atmospheric Water Vapour using GNSS Observables

On its way from the satellite to the ground-based receiver antenna, a GNSS signal travels through various layers of the Earth's atmosphere e.g. the ionosphere and the troposphere. Each of these has an effect on the signal which introduces a certain amount of error in the measured position. When the received signal is processed, the corresponding amount of error induced by each of the layers is estimated and is corrected for.

Ionosphere is the uppermost layer of the Earth's atmosphere that starts at around 50 kilometres above the Earth's surface and contains charged particles due to solar radiation. The electromagnetic properties of the ionosphere affect satellite signals travelling through it, which can result in case of GNSS in signal delays of over 100 meters. As the effect of the ionosphere can be largely removed by using a linear combination of the GNSS observables, it is not considered further in this study.

The troposphere is the lowest layer of the Earth's atmosphere and has a thickness ranging approximately from 9 kilometres to 16 kilometres above the Earth's surface at the poles and on the equator respectively. The primary greenhouse gas, i.e. atmospheric water vapour constitutes about 10% of the total tropospheric effect on the GNSS signals and due to its nature, is often termed as the wet part. As compared to the hydrostatic part, which constitutes 90% of the tropospheric effects and is highly predictable using models, the water vapour content has a very high temporal

and spatial variability and hence plays a significant role in the formation and propagation of weather systems (Marshall et al., 2007).

### Delay in the troposphere

The tropospheric propagation delay in the signal is dependent on the refractivity of the troposphere which can be expressed as (Thayer, 1974)

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{P_v}{T} Z_v^{-1} + k_3 \frac{P_v}{T^2} Z_v^{-1} \quad (1)$$

where  $P_{d,v}$  are the partial pressures of dry and wet air constituents in hPa,  $T$  is the temperature in K,  $Z_{d,v}^{-1}$  are the inverse compressibility factors for dry air and water vapour and  $k_{1,2,3}$  are experimentally determined coefficients in K/hPa. The path followed by the signal in the troposphere is assumed to be zenithal and therefore, the delay  $\Delta L$  between a point at height  $h$  and infinity is

$$\Delta L = 10^{-6} \int_h^{\infty} N(h) dh \quad (2)$$

where  $\Delta L$  is known as zenith total delay (ZTD) in mm and can be expressed as the sum of zenith hydrostatic delay ( $\Delta L_h$  or ZHD) and zenith wet delay ( $\Delta L_w$  or ZWD) i.e.

$$ZTD = \Delta L = \Delta L_h + \Delta L_w \quad (3)$$

$\Delta L_h$  can be approximated by using the surface pressure and location values in the widely used Saastamoinen hydrostatic model (Saastamoinen, 1972) i.e.

$$ZHD = \Delta L_h = \frac{2.2779 \pm 0.0024 \text{ mm} \cdot P_S}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00028 \frac{1}{\text{km}} \cdot h} \quad (4)$$

where  $P_S$  is the surface pressure in hPa,  $\varphi$  is the station latitude in degree,  $h$  is the height of the station in km above the ellipsoid.

The carrier signals are the primary observables for high-precision GNSS positioning and the can be estimated from the carrier phase observable. This observable can be observed as

$$\Phi = \rho + c(\tau_{sat} - \tau_{rcv}) - \Delta L_{iono} + \Delta L_{tropo} + \lambda N + \varepsilon_{\Phi}$$

(6)

where  $\rho$  is the geometric distance between the satellite and the receiver antenna in meters,  $c$  is the speed of light in vacuum in m/s,  $\tau_{sat,rcv}$  are the clock biases between satellite and receiver in seconds,  $\Delta L_{iono}$  is the ionospheric delay in meters,  $\Delta L_{tropo}$  is the tropospheric delay or the ZTD in meters,  $\lambda$  is the wavelength in meters,  $N$  is the integer phase ambiguity term (not to be confused with the refractivity  $N$  in Equation 1) and  $\varepsilon_{\Phi}$  are the unmodelled phase measurement errors in meters.

In this way, GNSS observations from a collection of ground-based receivers, in combination with auxiliary information (satellite and receiver positions, corrections computed from models of geophysical processes) are processed using various GNSS data processing software packages to obtain the ZTD estimates.

Once the ZTD has been estimated, ZHD is computed using Equation 4, and the ZWD can be obtained from

$$ZWD = ZTD - ZHD$$

(7)

ZWD can then be combined with meteorological data i.e. pressure and temperature to convert it to a quantity known as Integrated Water Vapour (IWV) which is given in kg/m<sup>2</sup> (Bevis et al., 1992, Bevis et al., 1994).

To convert the ZWD into IWV, the relation in Equation 8 can be used i.e.

$$IWV = \int_h^{\infty} \rho_v(h) dh \approx \kappa \Delta L_w$$

(8)

where

$$1/\kappa = 10^{-6}(k_3/T_m + k'_2)R_v$$

(9)

In Equation 9,  $R_v$  is the specific gas constant for water vapour and  $T_m$  is the mean temperature of the vertical

column of air above the GNSS receiver and is given by

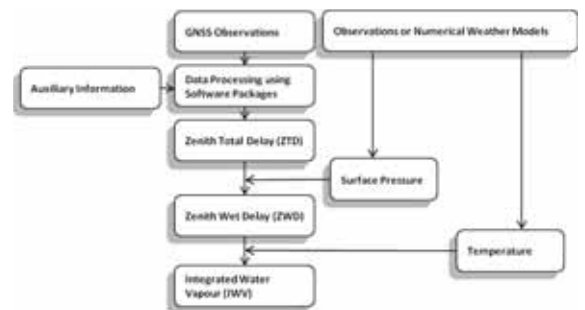
$$T_m = \frac{\int_h^{\infty} \rho_v dh}{\int_h^{\infty} (\rho_v/T) dh}$$

with the water vapour density

$$\rho_v = \frac{P_v}{R_v T}$$

such that the total density  $\rho = \rho_d + \rho_v$ .

The term IWV can be interchangeably used with the term Precipitable Water Vapour (PWV) which expresses IWV as the height of an equivalent column of liquid water in millimetres. The required meteorological data can be obtained either from observations, e.g. temperature and pressure sensors, or by interpolation from models of pressure and temperature, e.g. the Global Pressure and Temperature (GPT) model (Boehm et al., 2007). Figure 1 summarizes this process of estimating IWV from raw GNSS observations.



1\_ Estimating IWV from GNSS Observations

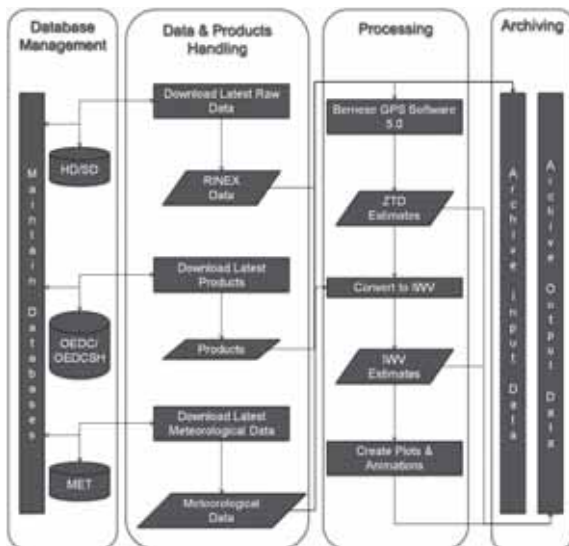
Surface pressure values at the locations of the GNSS receivers can be obtained from either observations or models. Using the pressure values, ZHD is computed and subtracted from the ZTD estimates to obtain ZWD. Finally, ZWD is converted to IWV using the temperature values, again either from observations or from models. Although IWV is of primary interest for weather forecasting and climate research, for consistency, it is only ZTD which is usually assimilated into NWM before it is converted to IWV using homogeneous temperature values within the model.

**Near Real-Time GNSS**

In order to assimilate the GNSS-derived ZTD estimates into the NWM which operate at high update rates e.g. hourly, it is necessary to obtain the estimates with a low latency i.e. in near real-time (NRT). Research has shown that assimilation of NRT ZTD in NWM has a positive impact on the quality of weather forecasts (de Haan 2011, Bennitt et al., 2011).

The University of Luxembourg in collaboration with the University of Nottingham has setup two NRT GNSS data processing systems for estimating ZTD and IWV. One of the systems (NRT1h) has an update cycle of 1 hour and the other (NRT15m) one of 15 minutes. The development of these systems is part of the PhD project PWVLUX.

Both the NRT systems collect GNSS data in Receiver Independent Exchange format (RINEX) from a distribution of GNSS stations spread all over Europe, process the RINEX data with auxiliary information to estimate the ZTD and convert the ZTD into IWV using meteorological data. Figure 2 illustrates the operation of the NRT systems.



2\_ Operational diagram of the NRT Systems

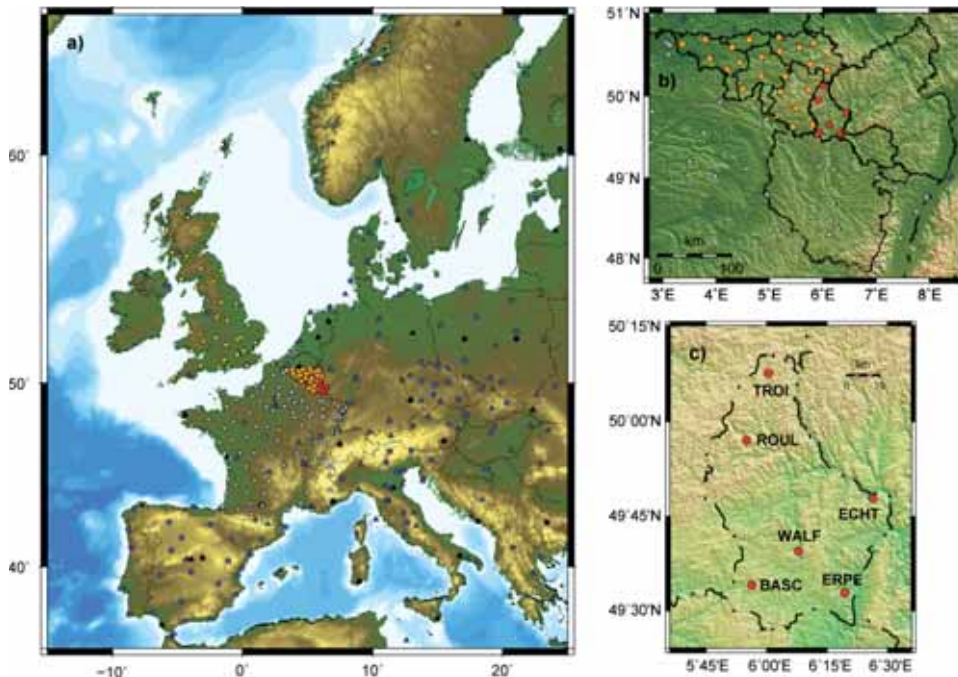
The overall operation of these systems is divided into four parts i.e. database management, data and products handling, processing and archiving. At the beginning of each session, the database management part is executed in which the databases containing information about available and required hourly (HD in Figure 2) and sub-hourly (SD in Figure 2) data, available and required products (OEDC, OEDCSH in Figure 2), and available and required meteorological data (MET in Figure 2) are maintained. The data and products handling part then downloads the required data and products onto the local server. After the data and products handling, the processing part is commenced which processes the downloaded raw data with the Bernese GPS Software 5.0 (Dach et al., 2007) and converts the obtained ZTD to IWV. Finally, the archive part archives the raw data, products and processing results on the local server.

The network of GNSS stations (Figure 3) has been selected with the aim of achieving good spatial coverage of Europe with a focus on Luxembourg and the Greater Region. The triangles represent the GNSS stations providing hourly data and circles represent those providing real-time streams. Table 1 shows the list of the GNSS networks used. The hourly NRT system processes data from the stations that either provide real-time streams or hourly data. On the other hand, the sub-hourly NRT system only processes data from real-time stations.

Network	Region
SPSLux (red)	Luxembourg
WALCORS (orange)	Wallonie (Belgium)
RGP (gray)	France
OSGB+Geonet (yellow)	UK
EPN (blue)	Europe
IGS (black)	Global

Table 1 GNSS data providers

In both the hourly and sub-hourly NRT systems, the computation of ZTD involves the formation of baselines between the neighbouring stations and therefore, the density and distribution of the network has an influence on the ZTD estimates. Another important factor that influences the quality of the estimated ZTD is the type of GNSS satellite orbit product used as these are available with different accuracy



3\_ NRT Network used for PWVLUX on scales of a) Europe, b) the Greater Region and c) Luxembourg

levels depending on their latency (Douša 2010, Ge et al., 2002). Along with its benefits, NRT processing imposes a requirement of large computing power and efficient data communication in order to timely provide the results for assimilation into the NWM.

For the climate variability analysis, it is possible to combine the NRT ZTD estimates for long time spans by calculating the mean values at low sampling intervals e.g. twice a day. A global set of GNSS data is available since 1994 and post-processing of this data is possible using the most accurate satellite orbit products and models. For the dense GNSS station distribution in Luxembourg and the Greater Region this is possible for the period since 2006, and provides, at the time of writing, an initial six year record of the regional variations in atmospheric water vapour.

**Preliminary Results**

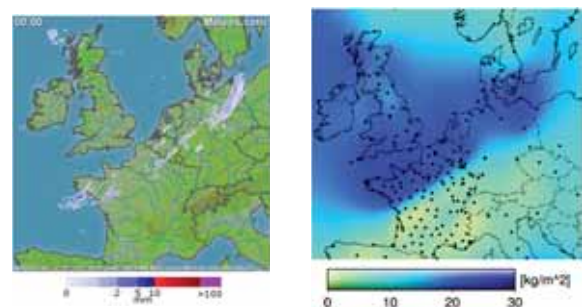
During 22-23 February 2012, a warm front (i.e. a warm air-mass moving towards a cold air-mass) moved over northern France, Belgium and Germany. A satellite picture of the cloud distribution, as taken by Meteosat second generation (<http://www.esa.int/SPECIALS/MSG/>), associated with this front at 2012-02-23 00:00UTC is shown below.



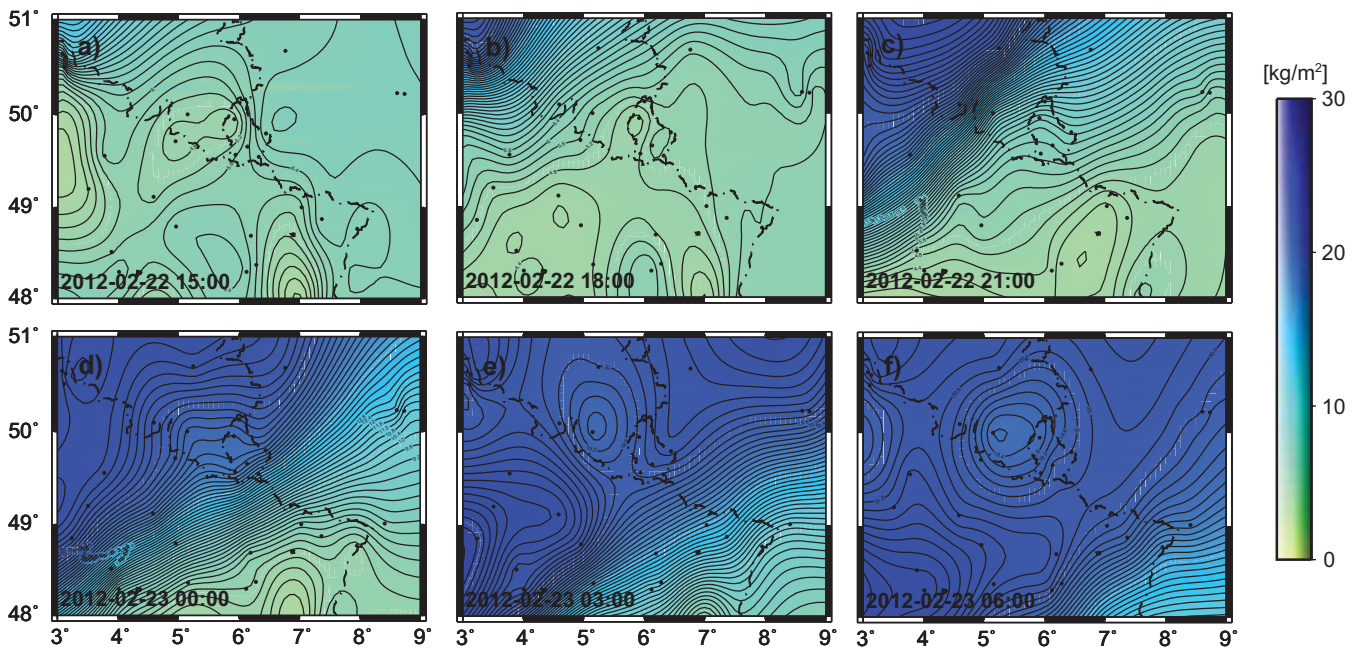
4\_ Satellite picture of cloud distribution at 2012-02-23 00:00UTC  
This front was associated with a low-pressure system situated over southern Scandinavia. Cloud formation and

stratiform precipitation was caused by riding of warm air-mass over the cold air-mass and a light rainfall at 04:00UTC was observed in Luxembourg. For this event it is possible to compare the 2D IWV maps generated by the NRT1h system with precipitation information obtained from the weather radar ([www.meteo.de](http://www.meteo.de)) and this comparison is shown in Figure 5.

Figure 5(a) shows the precipitation in millimetres at 2012-02-23 00:00UTC over Europe as captured by weather radar whereas Figure 5(b) is a 2D map of the IWV distribution over the same region at the same time. The black dots in Figure 5(b) represent the ground-based GNSS stations which are included for processing in NRT1h. To generate the IWV maps like that in Figure 5(b) in the NRT1h system, IWV is first estimated over all the individual stations and then a grid with a resolution of 15 minutes is computed by block averaging followed by an adjustable tension continuous curvature surface gridding algorithm (Smith et al., 1990). Therefore the density of the network of GNSS stations has an influence on the quality of these maps. It must be noted that at this point the systems do not automatically detect and remove outlying ZTD or IWV estimates. It can be seen that the zones with the largest gradients in IWV overlap with the fore-front of the precipitation events caused by the warm front as identified by the weather radar.

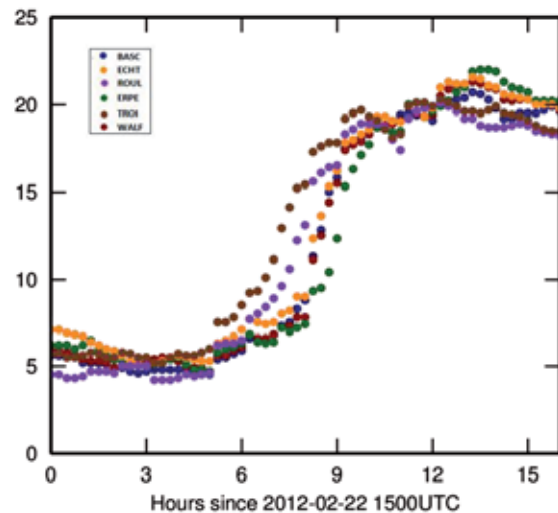


5\_ Comparison of weather radar (a) and IWV (b) at 2012-02-23 00:00UTC  
The output of the NRT systems has a sampling interval of 15 minutes and hence the IWV maps are generated for every 15th minute. This makes it possible to graphically observe the changes in the amount of IWV and compare these



6\_ 3-hourly plots for IWV over Luxembourg and the Greater Region for 2012-02-22 15:00UTC to 2012-02-23 06:00UTC

changes with the weather processes. Such an example is presented in Figure 6 which shows the IWV maps obtained by NRT1h for a) 2012-02-22 15:00UTC, b) 2012-02-22 18:00UTC, c) 2012-02-22 21:00UTC, d) 2012-02-23 00:00UTC, e) 2012-02-23 03:00UTC and f) 2012-02-23 06:00UTC. The sequence of IWV maps in Figure 6 shows the evolution of the distribution of IWV corresponding to the passage of the warm front shown in Figure 5 over Luxembourg and the Greater Region.



7\_ IWV Time series for the 6 GNSS stations in Luxembourg for the period 2012-02-22 15:00UTC to 2012-02-23 06:00UTC

Figure 7 presents the time series of IWV over the six GNSS stations in Luxembourg for the same time-period as that in Figure 6. It can be seen that the amount of IWV increases by approximately  $15\text{kg/m}^2$  as the warm front passes over Luxembourg. The station Troisvierges (TROI) is the first to observe this change and as the front proceeds in a southeasterly direction, the other stations observe this change too. Over TROI, IWV reaches a value of  $15.2\text{kg/m}^2$  at 2012-02-22 22:45UTC whereas over Erpeldange (ERPE), the same value is reached at 2012-02-23 00:15UTC which indicates that the warm front has taken about 90 minutes to travel from Troisvierges to Erpeldange (approximately  $28\text{km/h}$ ). This demonstrates the possibility of calculating

the speed and direction (not explicitly shown) of a moving weather front using GNSS and hence storms can be tracked.

### Conclusions

GNSS meteorology has been introduced as a tool for monitoring atmospheric water vapour for weather forecasting and to monitor annual to decadal climate variations. Two near real-time (NRT) processing systems have been developed at the University of Luxembourg to estimate zenith total delay and integrated atmospheric water vapour with hourly and 15-minute update cycles, respectively. First preliminary results for the hourly NRT system for a warm front and its corresponding precipitation events crossing over Luxembourg and the Greater Region on 22-23 February 2012 are presented. The 2D maps of IWV are compared with cloud distribution and precipitation maps from satellite and weather radar data, respectively, and a good agreement in the location of the front system has been found. Furthermore, it has been demonstrated how GNSS-derived atmospheric water vapour estimates could play an important and complementary role in short-term weather forecasting for Luxembourg and the Greater Region. In order to extend these benefits to regional climate studies it is of utmost importance for the existing GNSS infrastructure to be maintained at current levels. In this way the GNSS measurements will be able to support long-term consistent atmospheric water vapour estimates over decades.

### Acknowledgements

This project is funded by the Fonds National de la Recherche, Luxembourg (Reference No. 1090247). For the provision of GNSS observations we are thankful to the Administration du cadastre et de la topographie (ACT), Luxembourg, particularly Bernard Reisch and Romain Gales, and to the Service public de Wallonie, Belgium, where Séverine Dyon supported this work. We would also like to express our gratitude to the Service Météorologique de Luxembourg of the Administration de la navigation aérienne, especially Martina Reckwerth and Gilbert Christoffel, for their advice on meteorological information. We also thank the British Isles continuous GNSS Facility ([www.bigf.ac.uk](http://www.bigf.ac.uk)), the French Réseau GNSS Permanent ([rgp.ign.fr](http://rgp.ign.fr)), EUREF and the IGS for GNSS data and products.

Furqan Ahmed, Norman Teferle, Richard Bingley, Jörg Bareiss

## REFERENCES

- Bennett, G. (2008) Use of Ground based GNSS data in NWP at UK Met Office, E-GVAP workshop, Copenhagen, 6 November 2008
- Bennett, G., Levick, T., (2011) The impact of assimilating zenith total delay measurements from Ground-based GNSS receivers in the Met Office numerical weather prediction UK model, *Geophysical Research Abstracts* Vol. 13, EGU2011-6705
- Bevis, M., S. Businger, Chiswell S., T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, R. H. Ware (1994) GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water, *Journal of Applied Meteorology*, 33(3), 379-386
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware (1992) GPS Meteorology: Remote Sensing of atmospheric water vapour using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, 97(D14), 15 787 15 801
- Boehm J., Heinkelmann R., Schuh H. (2007) Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications, *Journal of Geodesy* 81(10), 679–683
- Bruyninx C., Legrand J., F. Roosbeek (2008) Status and Performance of the EUREF Permanent Tracking Network, June 18-21 2008, EUREF Publication, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie
- Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl (Eds.) (2007) *Bernese GPS Software Version 5.0*, 612, Astronomical Institute, University of Bern
- De Haan, S. (2011) Impact of GPS ZTD on Rainfall Estimates in an Hourly Update Cycle of a Numerical Weather Prediction Model, *Geophysical Research Abstracts* Vol. 13, EGU2011-4222
- Douša, J. (2010) The impact of errors in predicted GPS orbits on zenith troposphere delay estimation., *GPS Solutions*, 14(3), 229-239
- Dow, J.M., Neilan, R. E., and Rizos, C. (2009) The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of Geodesy*, 83(3-4), 191–198
- Elgered, G. (2001) An overview of COST Action 716: exploitation of ground-based GPS for climate and numerical weather prediction applications, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(6-8), 399-404
- Ge, M., E. Calais, and J. Haase (2002) Sensitivity of zenith total delay accuracy to GPS orbit errors and implications for near-real-time GPS meteorology, *Journal of Geophysical Research*, 107(D16), 4315
- Hofman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. (2007) *GNSS Global Navigation Satellite Systems*, SpringerWienNewYork
- Huang, X. Y., H. Vedel, N. Gustafsson, M. Ridal, A. Jupp, D. Offiler, J. Eyre, B. Navascues, J. Garcia-Moya, R. Ferretti, C. Faccani, G. Visconti, S. de Haan, J. de Vries, S. Barlag, H. Jarvinen, R. Eresmaa, O.F. d'Andon, O. Lesne, W. Jiang, G. Elgered, J. Johansson, O. Kristansen, H.P. Kierulf, H.-P. Plag, F. Vespe, R. Pacione, A. Rius, E. Brockmann, J. Dousa, V. Filler, H. van der Marel (2003) TOUGH: Targeting optimal use of GPS humidity measurements in meteorology, *International Workshop on GPS Meteorology*, Tsukuba, Japan, 14-17 January 2003
- Iwabuchi, T., Braun, J. J., Van Hove, T. (2009) Impact of Ground-based GPS Precipitable Water Vapour and Cosmic GPS Refractivity Profile on Hurricane Dean Forecast, 13th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS), 14 January 2009
- Marshall, J., Plumb, R. A. (2007) *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics An Introductory Text*, Elsevier Academic Press
- Moll, P., Poli, P., Ducrocq, V. (2008) Use of ground based GNSS data in NWP at Météo-France, E-GVAP workshop Copenhagen, 6 November 2008
- Nilsson, T., and Elgered, G. (2008), Long-term trends in the atmospheric water vapor content estimated from ground-based GPS data, *Journal of Geophysical Research*, 113(D19101)
- Saastamoinen, J. (1972) Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, in *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, Geophysics Monograph Series, 15, 247-251, AGU, Washington, D.C.
- Smith, W. H. F., Wessel, P. (1990) Gridding with a Continuous Curvature Surface in Tension, *Geophysics*, 55(3), 293-305
- Stendel, M. (2006) Monitoring Climate Variability and Change by Means of GNSS Data, *Atmosphere and Climate*, Part 6, 275-285
- Thayer, G. D. (1974) An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Science*, 9(10), 803–807
- Vedel, H., X. Y. Huang, J. Haase, M. Ge, and E. Calais (2004) Impact of GPS Zenith Tropospheric Delay data on precipitation forecasts in Mediterranean France and Spain, *Geophysical Research Letters*, 31(L02102)



# RETHINK INNOVATION THINK TUDOR

As a leader in applied research in Luxembourg, Tudor responds to your needs by mobilising its scientific and technological competences in nine innovation programmes, each targeting specific challenges.

**MANUFACTURING INDUSTRY**

**CONSTRUCTION**

**ECOTECHNOLOGY**

**MOBILITY**

**TRANSPORT & LOGISTICS**

**HEALTH**

**PUBLIC SERVICES**

**INNOFINANCE**

**HUMAN CAPITAL**

**tudor**  
PUBLIC RESEARCH CENTRE HENRI TUDOR

Innovating together

For further information: [www.tudor.lu/innovation-programmes](http://www.tudor.lu/innovation-programmes)

In Zeiten, in denen sich die Konsequenzen der globalen Erwärmung immer deutlicher zeigen, wird vermehrt zum Umdenken bei den Energiekonzepten aufgerufen. Die europäischen Länder haben sich verpflichtet mehr Energie aus erneuerbaren Quellen zu nutzen. In Luxemburg wird davon ein Großteil aus Biomasse stammen, die z. B. durch anaerobe Vergärung zum Energieträger werden kann. Da bei der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen das Verständnis der aufeinander folgenden Abbauschritten eine große Rolle spielt, wurde dieser Prozess für die heutzutage am meisten verwendete silierte Energiepflanze Mais genauer untersucht. Dieser Artikel stellt die wichtigsten Forschungserkenntnisse zusammen, die im Rahmen eines vierjährigen Doktorandenprojekts gesammelt wurden.

Ein Forschungsprojekt der Universität Luxemburg

# MONOVERGÄRUNG VON MAISSILAGE UND ZELLULOSE

Dr.-Ing. Katarzyna Golkowska, Prof. Dr.-Ing. Manfred Greger

## Energie aus Pflanzen

In den Zeiten von kontinuierlich steigenden Preisen für fossile Energieträger aber auch mit Hinblick auf die Reduzierung von CO<sup>2</sup>-Emissionen gewinnt die anaerobe Vergärung von Biomasse immer mehr an Bedeutung. Sowohl im europäischen Ausland als auch hier im Lande wird verstärkt auf die Entwicklung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen gesetzt. In Luxemburg unterstützt der Gesetzgeber mit dem „Règlement Grand-Ducal“ vom 08.02.2008 die Energieproduktion aus Biogas mit einem Bonus-System, das je nach Anlagengröße und eingesetzter Technologie variieren kann. Laut „Luxemburger Aktionsplan für erneuerbare Energien“<sup>1</sup>, um die durch EU vorgegebenen Ziele zur Nutzung der erneuerbaren Energien zu erfüllen, müsste die elektrische Leistung von Biogasanlagen in Luxemburg bis zum 2020 um das Vierfache steigen<sup>2</sup>.

Im Focus der Biogasanlagebetreiber steht derzeit die Beimischung zur Gülle bzw. die alleinige Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo). Mit dem Einsatz von Energiepflanzen lassen sich um 50% bis 200% höhere Biogasausbeuten erzielen als bei der Fermentierung von Gülle allein<sup>3</sup>. Dadurch sind die NaWaRo als Substrat für die Energieerzeugung prädestiniert. Ein weiterer Vorteil ist, dass auch die Bauern die über landwirtschaftlich genutztes Land verfügen aber keine Viehhaltung betreiben an der Energieerzeugung aus NaWaRo beteiligt sind. Aufgrund der Anbauvorteile, einfacher Silierung und des Gasertrages gehört Mais zu den am weitesten verbreiteten Energiepflanzen in Europa. Maissilage wird auch am häufigsten als Cosubstrat bzw. Hauptsubstrat für Biogasanlagen gewählt.

## Herausforderung für die Wissenschaft

Schon seit dem Anfang der achtzigsten Jahre wird verstärkt im Bereich anaerober Vergärung (ohne Anwesenheit von Sauerstoff) von Biomasse geforscht. Ein Großteil des aktuellen Wissensstands basiert auf Untersuchungen im Abwasser-, Gülle- und Abfallbereich. Sowohl von Forschern als auch von Praktikern wurden im Laufe der Zeit verschiedene Prozessparameter erstellt, die die Überwachung von Biogasanlagen ermöglichen und dadurch zu einer stabilen

Biogasproduktion beitragen. Demnach wird der Betrieb instabil wenn:

- \_die Reaktorbelastung in kontinuierlichem Betrieb 4 kg organischer Trockensubstanz (oTS) per m<sup>3</sup> Fermentervolumen und Tag überschreitet
- \_das Verhältnis von erzeugten flüchtigen organischen Säuren (FOS) zur Carbonat-Pufferkapazität (TAC) eines Fermenters den Wert von 0,4 überschreitet
- \_der pH-Wert unter 6,8 sinkt
- \_Mangel an Spurenelementen herrscht (besonders bei der thermophiler Vergärung, von NaWaRo d.h. im Temperaturbereich um 55°C von NaWaRo)
- \_das Verhältnis von Propion- zu Essigsäure den Wert von 0,5 überschreitet
- \_Die Konzentration an Butter- bzw. Valeriansäure den Wert von 50 mg/l überschreitet

Die meisten Biogasanlagen werden mesophil d.h. im Temperaturbereich um 38°C, betrieben. Der größte Teil der Publikationen bezieht sich auf die Vergärung von Klärschlamm, Gülle und Bioabfall unter mesophilen Bedingungen. Da die allgemeine Vergärungsgrundlage unabhängig von Substratart, Betriebsweise oder Betriebstemperatur ist<sup>4</sup>, wurde angenommen, dass die Abbauewege auch hier zutreffen und das Verhalten der Betriebsparameter allgemein gilt (und so auch für die Vergärung von NaWaRo). Bei der in den letzten 10 Jahren verstärkten Verwendung von NaWaRo als Gärsubstrate traten auch vermehrt Probleme mit der Reaktorstabilität auf. Demzufolge wird derzeit auch der Forschungsfokus verstärkt auf die Vergärung von Energiepflanzen gelegt.



Abb.1 Untersuchten Substrate: Maissilage und mikrokristalline Zellulose

Die neuesten Forschungsergebnisse zeigen, dass abhängig von der im Reaktor vorhandenen Biomasse, vom Substrat



bzw. der Vergärungstemperatur sich die Zusammensetzung der bakteriellen Gemeinschaft anders gestaltet<sup>5</sup>. Der Substratabbau kann über verschiedene Wege stattfinden. Zusätzlich kann der Bedarf an Mikroelementen während der NaWaRo Vergärung höher sein als für andere bisher benutzte Substrate.

### Schwerpunkte des Forschungsprojekts

Auch in Luxemburg wird im Bereich der Verwendung von NaWaRo geforscht. Die Universität Luxemburg will mit den Ergebnissen aus dem Doktoranten-Forschungsprojekt „Anaerobe Monovergärung von Zellulose und Maissilage“ zum besseren Verständnis der Vorgänge bei dem anaeroben Abbau von Energiepflanzen beitragen<sup>6</sup>. Zwei Substrate wurden im Rahmen der Studie untersucht (s. Abb. 1): das landwirtschaftliche Substrat Maissilage und das Modells substrat mikrokristalline Zellulose. Es wurden Batch-, quasi-kontinuierliche und kontinuierliche Versuchsserien im Labormaßstab unter mesophilen (38°C) und thermophilen (55°C) Bedingungen durchgeführt. Sowohl die Gärmasse als auch das erzeugte Biogas wurden in verschiedenen Vergärungsstadien umfassend analysiert. Dabei wurden unter anderem auch die in der Biogaspraxis verbreiteten Überwachungsparameter, wie pH-Wert, Redoxpotenzial, FOS und TAC erfasst und ausgewertet. Abb. 2 zeigt schematisch den Aufbau eines Versuchsreaktors (rechts) sowie den ganzen Satz an Fermentern einer Versuchsreihe (links).



Abb.2 Fermentationsreaktoren einer Versuchsreihe (links) und ein Schema des Versuchsaufbaus (rechts)

Drei Hauptaspekte wurden im Rahmen der Studie untersucht: Gärverhalten bakterieller Biozönose unter erhöhten Einzelbelastungen, Einfluss der Substratzusammensetzung und Temperatur auf den Gärprozess sowie Vergleich des Gärverlaufs bei unterschiedlichen Betriebsweisen (Batch,

quasi-kontinuierlich bzw. kontinuierlich). Die gesammelten Daten wurden weiterhin zur Modellierung des Substratabbaus mit dem Reaktionsgeschwindigkeitsansatz erster Ordnung bzw. von Monod<sup>7</sup> eingesetzt und sind in<sup>6,8</sup> publiziert.

### Stoßbelastungen gefährden stabilen Vergärungsprozess nicht

In thermophilen Batch-Experimenten wurden sechs Reaktorbelastungen im Bereich 5,7 kg oTS/m<sup>3</sup> bis 34,3 kg oTS/m<sup>3</sup> untersucht. Keine der getesteten Stoßbelastungen führte zu einer dauerhaften Systemstörung oder Versäuerung des Reaktorinhalts. Auch die nach dem Abschluss des Versuchs erzielten Biogaserträge waren gleich, was bedeutet, dass in jedem Versuch ein ähnlicher Substratabbaugrad erreicht wurde. Nur einer der betrachteten Inhibierungsparameter (FOS/TAC) lag durchgehend im instabilen Bereich für Stoßbelastungen höher als 5,7 kg oTS/m<sup>3</sup>. Der einzige eindeutige Unterschied zwischen den verschiedenen Belastungen konnte bei der Auswertung der Gasbildung beobachtet werden. Je höher die untersuchte Belastung war, desto langsamer verlief der Substratabbau. Während die spezifische Gasbildung für 5,7 kg oTS/m<sup>3</sup> und 11,4 kg oTS/m<sup>3</sup> noch identisch verlief und die Biogasproduktion nach 10 Tagen fast abgeschlossen war, dauerten die Versuche mit 17,1 kg oTS/m<sup>3</sup> und 22,9 kg oTS/m<sup>3</sup> etwa 4 Tage länger um den gleichen Substratabbaugrad zu erreichen. Für 28,6 kg oTS/m<sup>3</sup> und 34,3 kg oTS/m<sup>3</sup> verlängerten sich die Abbauezeiten auf das Dreifache im Vergleich zu den kleinsten Belastungen. Insgesamt wurde gezeigt, dass entgegen der Erwartung auch sehr hohe Stoßbelastungen zu keiner permanenten Reaktorstörung führten<sup>9</sup>.

### Optimaler Abbau unter mesophilen Bedingungen

Bei der Vergärung von Maissilage und Zellulose wurden für den mesophilen als auch für den thermophilen Temperaturbereich für jedes Substrat 3 Batch-Experimente mit gleicher Belastung durchgeführt (5,5 ± 0,2 kg oTS/m<sup>3</sup>; 11,2 ± 0,3 kg oTS/m<sup>3</sup>; 16,9 ± 0,4 kg oTS/m<sup>3</sup>). Ein stabilerer Fermentationsvorgang und ein höherer Methangehalt im Biogas wurden unter mesophilen Bedingungen beobachtet (s. Tab. 1). Der auf die Substratzufuhr bezogene spezifische Biogasertrag war für beide untersuchten Temperaturen gleich. Im Gegensatz zu Berichten aus der Literatur<sup>10</sup> erfolgte unter me-

sophilen Bedingungen ein schnellerer Substratabbau. Da dieser Effekt für beide Substrate sichtbar war, weist er auf eine Inhibierung im thermophilen Betrieb hin, die durch keinen Kontroll-Parameter angezeigt wurde (pH, FOS, TAC, leichtflüchtige organische Säuren, Redoxpotenzial). Sie ist möglicherweise auf einen Mangel an Spurenelementen zurückzuführen.

Tab. 1 Optimale Methanproduktion unter mesophilen Bedingungen

Substrat	organische Belastung [kg oTS/m <sup>3</sup> ]	Methangehalt im Biogas [%]		Methanertrag [l <sub>N</sub> /kg oTS]	
		38°C	55°C	38°C	55°C
Zellulose	5,5 ± 0,2	55	55	348	333
	11,2 ± 0,3	58	53	394	348
	16,7 ± 0,2	56	52	392	340
Mais	5,6 ± 0,1	60	56	388	328
	11,2 ± 0,3	59	57	382	402
	17,2 ± 0,1	55	56	380	381

### Unterschiedliche Abbauwege für Mais und Zellulose

Die Analyse von flüchtigen organischen Säuren zeigte zwei unterschiedliche Abbauwege für Maissilage und Zellulose. Während der Abbau von Zellulose hauptsächlich über die Essig- und Propionsäure stattfand erfolgte die Vergärung von Maissilage verstärkt über die Buttersäure als Zwischenprodukt. Dieser Effekt war ausgeprägter für thermophile Bedingungen. Die Analyse des Redoxpotenzials während der Maisvergärung wies auf die Konditionen hin, die für eine verstärkte Wasserstoffbildung optimal sind. Es ist bekannt, dass sowohl die Bildung von Buttersäure als auch ihr Abbau von verstärkter Wasserstoffbildung begleitet werden. Diese Unterschiede im Abbau von Maissilage im Vergleich zum klassischen Abbauweg, über Essig- und Propionsäure, wurden bisher in der Literatur nicht berichtet. Sie sind für Biogasanlagenbetreiber dahingehend von großer Bedeutung, da nach diesen Ergebnissen auch stark erhöhte Buttersäurekonzentrationen nicht notwendigerweise auf eine Instabilität hinweisen. Sie zeigen lediglich einen anderen Abbauweg des Substrates.

### Zwei Inhibierungsmechanismen im thermophilen Betrieb

Bei der Vergärung von Maissilage in der thermophilen Betriebsweise wurden zwei Inhibierungsmechanismen beobachtet. (1) Die Inhibierung bedingt durch erhöhten

Essig- und Propionsäuregehalt trat bei der Fütterung von 17,6 kgVS/m<sup>3</sup> im quasi-kontinuierlichen Betrieb (Fütterung alle 3 Tage) auf. Während des Abbaus wurden die Höchstkonzentrationen von 3,4 g/l und 3,3 g/l für Essig- bzw. Propionsäure gemessen. Die auftretende Übersäuerung des Reaktors war reversibel. Beide inhibierende Säuren wurden innerhalb von 10 Tage nach dem Versuchsende komplett abgebaut. (2) Während der kontinuierlichen Vergärung von Maissilage mit der täglichen Reaktorbeschickung von 11,7 kg oTS/(m<sup>3</sup>·d) wurde dagegen eine Inhibierung mit erhöhten Konzentrationen an Essig- und Buttersäure beobachtet. Der Anstieg der Essigsäurekonzentration auf 5 g/l und der n-Buttersäurekonzentration auf 4 g/l erfolgte schon nach 6 Beschickungsvorgängen. Trotz eines frühzeitigen Versuchabbruchs nach 6 Tagen blieb die Reaktorversäuerung dauerhaft erhalten und war somit irreversibel.

### Hohe Anpassungsfähigkeit bei häufiger Beschickung

Sowohl im quasi-kontinuierlichen als auch im kontinuierlichen Betrieb unter thermophilen Bedingungen zeigte die bakterielle Biozönose eine hohe Anpassungsfähigkeit bei erhöhten Reaktorbelastungen (s. Abb. 3) bzw. häufiger Beschickung. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass bei der Reduzierung des Beschickungsintervalls von 3 auf 1 d (Übergang von einer quasi-kontinuierlichen auf eine kontinuierliche Betriebsweise) schon nach 2 Beschickungsperioden eine ähnliche spezifische Gasproduktion erreicht wurde. Somit erfolgte der Abbau der gleichen Substratmenge im kontinuierlichen Versuch dreimal schneller. Die Anpassungsgeschwindigkeit der bakteriellen Kulturen war sehr hoch.

### Schlussfolgerungen für die Praxis

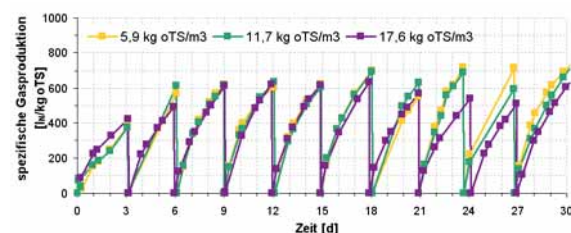


Abb.3 Hohe Anpassungsfähigkeit bei erhöhten Reaktorbelastungen: schon nach dem dritten Beschickungsvorgang wird für alle 3 Belastungen die gleiche spezifische Gasproduktion erreicht. Dies bedeutet, dass für die höchste Belastung eine dreifach schnellere Abbaurrate erreicht wurde.

Aus den Ergebnissen lassen sich zahlreiche Hinweise für das Reaktordesign bzw. den Reaktorbetrieb formulieren. Die Ergebnisse der Substratvergärung im Batch-Betrieb werden benutzt, um den Gasertrag für eine Biogasanlage zu bestimmen. Die Studie mit Maissilage zeigte, dass bei der Übertragung des Ergebnisses eines Biogasertragstests vom Batch auf kontinuierlichen Betrieb eine Reduzierung des Methangehalts im Biogas um 3-4% vorzunehmen ist. Ferner wurden für die Zersetzung der langsam abbauenden Komponenten der Maissilage mit Hilfe der Kinetik 1. Ordnung die Geschwindigkeitskoeffizienten zu  $0,14-0,16 \text{ d}^{-1}$  angepasst. Diese Daten können für die Dimensionierung eines Biogasreaktors von Nutzen sein. Das oft in der Biogaspraxis zur Überwachung der Stabilität der Vergärung benutzte Propion-/Essigsäure-Verhältnis zeigte bei der Inhibierung durch Buttersäure keinen Hinweis auf Vergärungsprobleme. Auch die Konzentrationen an Butter- und Valeriansäure, die 50 mg/l überschreiten, werden oft in der Biogasbranche als Inhibierungsanzeichen angenommen. Bei ungestörter Vergärung von Maissilage in verschiedenen Temperaturbereichen und Betriebsweisen wurden in dem Forschungsprojekt auch Butter- und Valeriansäurekonzentrationen festgestellt, die knapp über 100 mg/l lagen, ohne dass sie den Fermentationsvorgang störten.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die gewöhnlich kontrollierten Betriebsparameter nicht immer eine Inoculum bezogene Inhibierung signalisieren. Somit kann auch im Praxisbetrieb eine Inhibierung, trotz regelmäßiger Reaktorkontrolle unentdeckt bleiben und eine Betriebsstörung verursachen. Ferner gibt es eine große Anpassungsfähigkeit der anaeroben Biozönose gegenüber einer erhöhten Reaktorbelastung. Die beobachteten zwei unterschiedlichen Inhibierungsarten weisen auf einen weiteren Forschungsbedarf im Bereich anaerober Vergärung von Energiepflanzen hin. Ebenso sollten die Erkenntnisse in noch längeren Versuchen überprüft werden. Nachwachsende Rohstoffe stehen auch im Mittelpunkt eines parallelen Forschungsprojekts der Universität Luxemburg. In diesem wird nicht nur die Methodologie für die CSB-Ermittlung der in einem Biogasreaktor vorliegenden Suspension sondern auch die Zusammensetzung

der bakteriellen Biozönose und Substratzusammensetzung in verschiedenen Abbaustadien untersucht. Diese Ergebnisse fließen dann in ein komplexes Modell ein, dass auf der Basis von ADM1 (Anaerobic Digestion Model 1 der International Water Association,<sup>11</sup>) erarbeitet wird.

### Danksagung

Die Autoren danken der Fa. IGLux s.à.r.l. für die Silagelieferungen, der ASTA Ettelbrück für NIRS- und Säureanalysen und der Kooperative Biogas Biekerich für die freundliche Versorgung mit dem Inoculum.

### LITERATUR

1. Ministère de l'Économie et du Commerce extérieur, (2010): Luxemburger Aktionsplan für erneuerbare Energien.
2. Biogas-Vereenigung A.s.b.l., (2012): Neuigkeiten (<http://www.biogas-vereinigung.lu/news.html>, 20.02.2012).
3. Weiland, P., (2003): Production and energetic use of energy of biogas from energy crops and wastes in Germany. In: Applied Biochemistry and Biotechnology, 109 (1-3), 263-274
4. Greger, M., Golkowska, K., (2009): Technologie der Biogaserzeugung. In: Review Technique Luxembourgeoise, 2, 77-81.
5. Demirel, B., Scherer, P., (2008): The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. In: Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 7(2), 173-190.
6. Golkowska, K., (2011): Anaerobic mono-digestion of maize and cellulose at different temperatures and operating modes. Dissertation der Universität Luxemburg.
7. Monod, J., (1950): La technique de la culture continue: théorie et applications. In: Annales de l'Institut Pasteur, 79(4), 390-410.
8. Golkowska, K., Sibisi-Beierlein, N., Greger, M., (2012): Kinetic considerations on thermophilic digestion of maize silage at different feeding modes. Chemie Ingenieur Technik, 2012, zur Veröffentlichung angenommen.
9. Golkowska, K., Greger, M., (2010): Thermophilic digestion of cellulose at high-organic loading rates. In: Engineering in Life Sciences, 10(6), 600-606.
10. Weiland, P., (2010): Biogas production: current state and perspectives. In: Applied Microbiology and Biotechnology, 85(4), 849-860.
11. Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., Sanders, W., Siegrist, H., Vavilin, V., (2002): Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1), IWA Publishing.

# Vorstellung einer neuartigen Berechnungsmethodik zur exakten Ermittlung von Temperaturänderungen realer Gase bei isenthalpen und isentropen Zustandsänderungen



Teil II – Isentrope Expansion

## THERMODYNAMISCHE ZUSTANDSÄNDERUNGEN REALER GASE

Dr. Thomas ANDREAS, Leiter F&E, Rotarex

Nachdem im ersten Teil dieses Fachbeitrags in der Ausgabe 01/2011 der Cahier Scientifique die isenthalpe Zustandsänderung realer Gase bei Expansion über sehr große Druckbereiche genauer betrachtet und die grundlegenden Berechnungsgleichungen hergeleitet wurden, geht es in diesem zweiten Teil nun um die Betrachtung der isentropen Zustandsänderung realer Gase.

Zur Einstimmung auf die Thematik vorab zwei Abbildungen, die ein sehr aktuelles und interessantes Anwendungsgebiet Technischer Gase zeigen. Es geht dabei um gasförmige alternative Kraftstoffe für den Einsatz in Kraftfahrzeugen. Bild 1 zeigt ein modernes Kraftfahrzeug, welches mit einem gasförmigen Energieträger betrieben wird. Farblich dargestellt sind die Gasspeicherbehälter und das komplette Gas-Management-System. Gasförmige Kraftstoffe könnten hier beispielsweise Methan oder Wasserstoff sein. Die Speicherdrücke liegen dabei beim Einsatz von Methan im Bereich von bis zu 500 bar und beim Einsatz von Wasserstoff im Bereich von bis zu 700 bar. Werden die Gase bei diesen hohen Speicherdrücken entnommen, stellen sich thermodynamische Zustandsänderungen ein. Je nachdem, wie schnell die gespeicherten Gase entnommen werden, handelt es sich dabei um isenthalpe (langsame Entnahme – Teillastbetrieb) oder um isentrope (schnelle Entnahme – Vollastbetrieb) Zustandsänderungen.

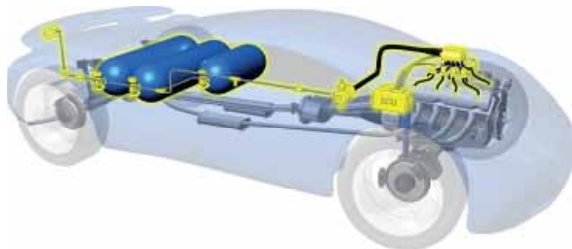


Bild 1 Kraftfahrzeug zum Einsatz alternativer gasförmiger Energieträger bzw. Kraftstoffe mit Gasspeicherbehältern und Gas-Management-System

Bild 2 zeigt etwas detaillierter ein vollständiges Gas-Management-System mit den wesentlichen Systemkomponenten.

Wie bereits erwähnt, wurde im ersten Teil dieses Fachbeitrags die isenthalpe Zustandsänderung explizit beschrieben. Im folgenden wird nun die isentrope Zustandsänderung realer Gase genauer untersucht.

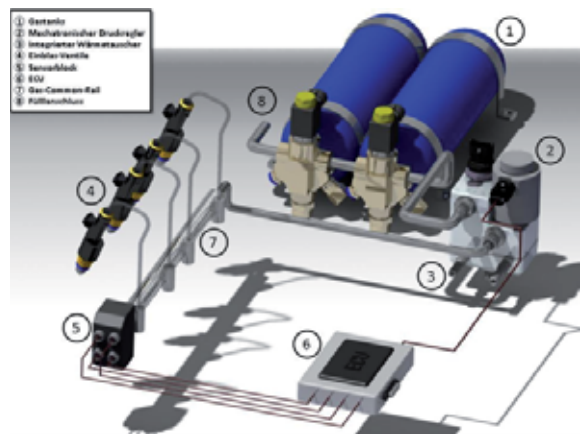


Bild 2 Prinzipieller Aufbau eines modernen Gas-Management-Systems in einem zukunftsweisenden Kraftfahrzeug

Eine isentrope Zustandsänderung stellt sich immer dann ein, wenn das Druckniveau eines Gases beim Durchströmen der Gasversorgungseinheit vom Speicherbehälter zum Verbraucher sehr schnell abgebaut bzw. reduziert wird und wenn sich ein entsprechend hoher Massenstrom einstellt. In der engsten Stelle des Entnahmepfades stellt sich darüber hinaus Schallgeschwindigkeit ein. Partiiell kann es zu Überschallströmungen mit erheblich höheren Strömungsgeschwindigkeiten kommen (Machzahlen von 3 und höher sind dabei keine Seltenheit).

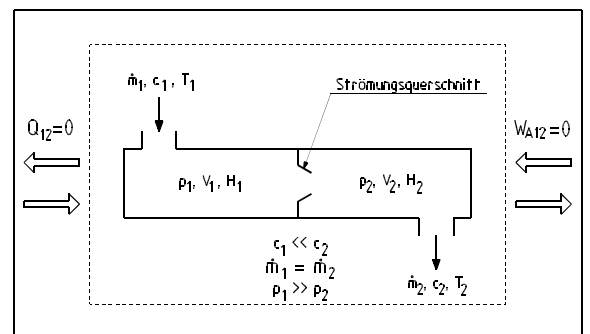


Bild 3 Physikalische Vorgänge bei der isentropen Entspannung eines realen Gases

Thermodynamisch deutet man die sehr rasche adiabatische Entspannung ( $c_1 \ll c_2$ ) eines unter Druck stehenden Gases auf ein niedrigeres Druckniveau als "Isentrope Expansion". Aus Bild 3 geht hervor, dass sich die Strömungsgeschwindigkeiten des Gases unmittelbar vor und hinter der Expansionsstelle sehr deutlich voneinander unterscheiden.

Nachfolgend werden nun die relevanten Berechnungsgleichungen zur exakten Bestimmung von Temperaturänderungen bei isentroper Expansion bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen (Druck und Temperatur) sowie Gasarten hergeleitet.

Ausgangsbasis für die Herleitung dieser Gleichung ist das totale Differential der Entropie eines realen Gases

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p \cdot dT + \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T \cdot dp \tag{1}$$

Die erste Ableitungsfunktion in Gleichung (1) kann wie folgt dargestellt werden

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{c_p}{T}\right) \tag{2}$$

Der zweite Ableitungsterm in Gleichung (1) kann über eine sog. Maxwell-Relation durch die Ableitung einer anderen thermodynamischen Zustandsfunktion ausgedrückt werden. Es gilt:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \tag{3}$$

Werden die beiden Ausdrücke nach Gleichung (2) und Gleichung (3) in Gleichung (1) eingesetzt, folgt für die Änderung der Entropie eines realen Gases die Gleichung

$$ds = \frac{c_p}{T} \cdot dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \cdot dp \tag{4}$$

Die allgemeine Gasgleichung für reale Gase lautet:

$$p \cdot v = R_i \cdot T \cdot Z(p, T) \tag{5}$$

Der Realgasfaktor ist eine Funktion von Druck und Temperatur. Bild 4 zeigt die Kennfelddarstellung der Realgasfaktoren von Methan. Bild 5 die Darstellung der Realgasfaktoren von Wasserstoff. Realgasfaktor 1 bedeutet ideales Gasverhalten. Abweichende Faktoren bedeuten entsprechend starkes Realgasverhalten. Je stärker der Realgasfaktor von „1“ abweicht, desto ausgeprägter ist das reale Gasverhalten.

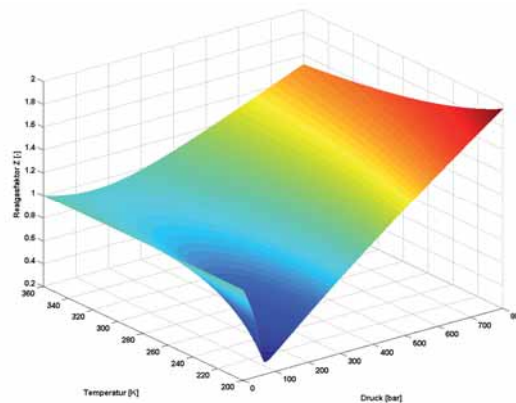


Bild 4 Realgasfaktoren von Methan

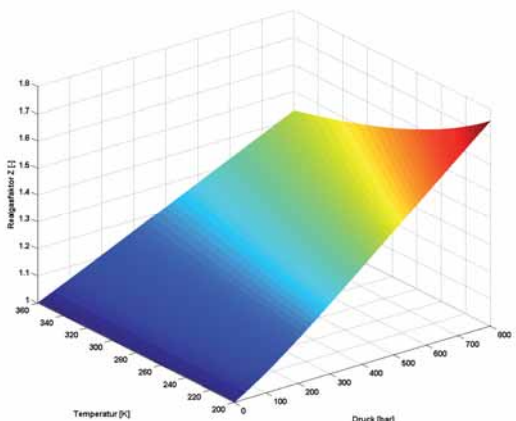


Bild 5 Realgasfaktoren von Wasserstoff

Zur Berechnung der isentropen Zustandsänderung realer Gase ist die Berücksichtigung der Steigungs- bzw. Richtungsgradienten der Realgasfaktoren von essentieller Bedeutung. Die Richtungsgradienten sind wie folgt definiert:

$$\left(\frac{\partial Z/Z}{\partial p/p}\right)_T = \left(\frac{p}{Z} \cdot \frac{\partial Z}{\partial p}\right)_T = \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial \ln p}\right)_T = Z_p \tag{6}$$

$$\left(\frac{\partial Z/Z}{\partial T/T}\right)_p = \left(\frac{T}{Z} \cdot \frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial \ln T}\right)_p = Z_T \tag{7}$$

Die Indizes bedeuten jeweils, dass eine Größe (Temperatur bzw. Druck) bei der Ableitung konstant gehalten und nach der anderen Größen differenziert wird.

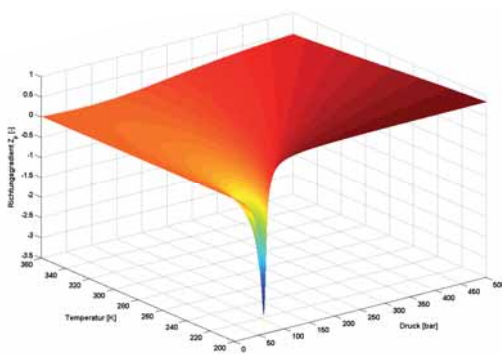


Bild 6 Steigungsgradienten  $Z_p$  von Methan

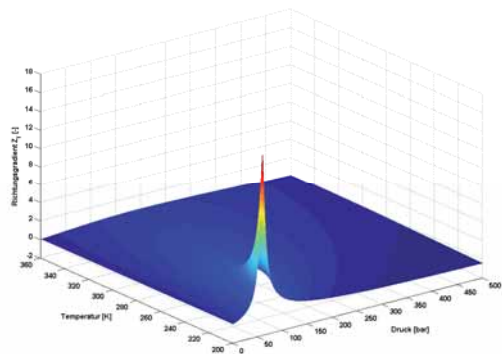


Bild 7 Steigungsgradienten  $Z_T$  von Methan

Die Bilder 6 und 7 zeigen die Kennfelder der entsprechenden Steigungsgradienten von Methan. Die Bilder 8 und 9 die von Wasserstoff.

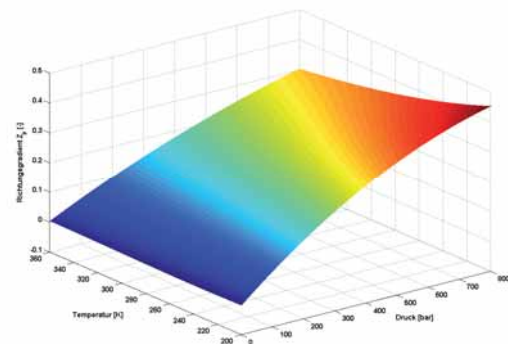


Bild 8 Steigungsgradienten  $Z_p$  von Wasserstoff

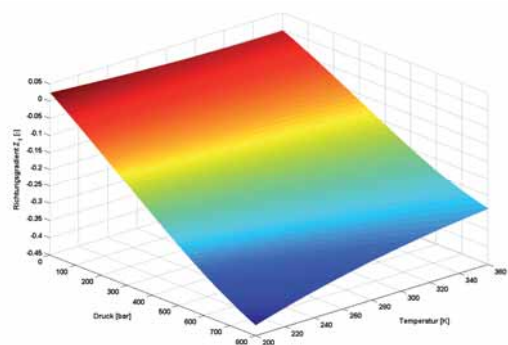


Bild 9 Steigungsgradienten  $Z_T$  von Wasserstoff

Im weiteren Verlauf muss nun für die allgemeine Realgasgleichung (5) die partielle Ableitung  $(\partial v / \partial T)_p$  gebildet werden:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p &= \frac{R_i}{p} \cdot \left[\frac{\partial(Z \cdot T)}{\partial T}\right]_p = \frac{R_i}{p} \cdot \left[Z + T \cdot \frac{\partial Z}{\partial T}\right]_p = \frac{R_i \cdot Z}{p} \cdot \left[1 + \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p\right] \\ \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p &= \frac{R_i \cdot Z}{p} \cdot [1 + Z_T] \end{aligned} \tag{8}$$

Gleichung (8) in Gleichung (4) eingesetzt ergibt:

$$ds = c_p \cdot \frac{dT}{T} - R_i \cdot Z \cdot [1 + Z_T] \cdot \frac{dp}{p} \tag{9}$$

Gleichung (9) muss nun für die weitere Herleitung nach  $(dp/p)$  umgestellt werden:

$$\frac{dp}{p} = \frac{c_p}{R_i \cdot Z \cdot [1 + Z_T]} \cdot \frac{dT}{T} - \frac{1}{R_i \cdot Z \cdot [1 + Z_T]} \cdot ds \tag{10}$$

Die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  für reale Gase ist wie folgt definiert:

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa \cdot [1 - Z_p] - 1} \cdot R_i \cdot Z \cdot [1 + Z_T]^2 \tag{11}$$

Diese Gleichung wird nun in Gleichung (10) eingesetzt, und es folgt der Ausdruck:

$$\frac{dp}{p} = \frac{\kappa \cdot [1 + Z_T]}{\kappa \cdot [1 - Z_p] - 1} \cdot \frac{dT}{T} - \frac{1}{R_i \cdot Z \cdot [1 + Z_T]} \cdot ds \tag{12}$$

Da eine isentrope Zustandsänderung betrachtet wird, gilt  $s = \text{konst.}$  sowie  $ds = 0$ . Gleichung (12) kann deshalb deutlich vereinfacht werden, und es folgt der Ausdruck:

$$\frac{dp}{p} = \frac{\kappa \cdot [1 + Z_T]}{\kappa \cdot [1 - Z_p] - 1} \cdot \frac{dT}{T} \tag{13}$$

Die Integration von Gleichung (13)

$$\int_1^2 \frac{dp}{p} = \frac{\kappa \cdot [1 + Z_T]}{\kappa \cdot [1 - Z_p] - 1} \cdot \int_1^2 \frac{dT}{T}$$

liefert schließlich folgenden Ausdruck:

$$\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \frac{\kappa \cdot [1 + Z_T]}{\kappa \cdot [1 - Z_p] - 1} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

bzw.

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa \cdot [1 + Z_T]}{\kappa \cdot [1 - Z_p] - 1}} \tag{14}$$

Gleichung (14) kann auch wie folgt aufgeschrieben werden:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa \cdot [1 - Z_p] - 1}{\kappa \cdot [1 + Z_T]}} \tag{15}$$

Beim Isentropenexponenten  $\kappa$  handelt es sich hierbei um den realen Isentropenexponenten, der sich wie folgt berechnet:

$$\kappa = \kappa_{re} = \frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{1}{[1 - Z_p]} \tag{16}$$

Die Bilder 10 und 11 zeigen die Isentropenexponenten von Methan und Wasserstoff, die freilich wiederum Funktionen von Druck und Temperatur sind, da  $c_p(p,T)$ ,  $c_v(p,T)$  und  $Z_p(p,T)$  ebenfalls von Druck und Temperatur abhängen.

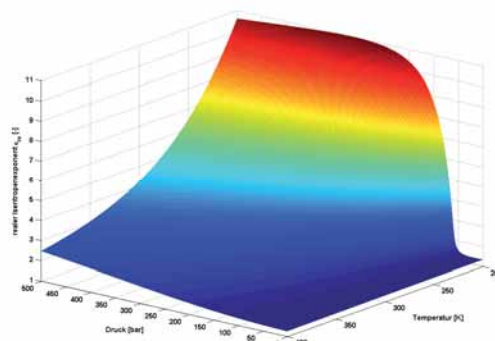


Bild 10 Isentropenexponenten von Methan

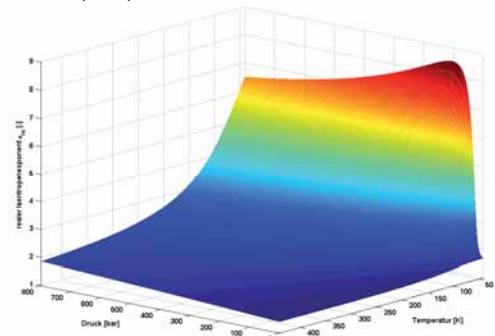


Bild 11 Isentropenexponenten von Wasserstoff

Gleichung (15) enthält neben den beiden intensiven Größen Druck und Temperatur noch die gasspezifischen Größen  $\kappa(p,T)$ ,  $Z_p(p,T)$  und  $Z_T(p,T)$ . Diese gasspezifischen Größen sind bei realen Gasen wiederum eine Funktion von Druck und Temperatur.

Um nun eine Temperaturänderung bzw. eine Endtemperatur bei isentroper Entspannung über große Druckbereiche zu berechnen, ist die folgende Gleichung anzuwenden:

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa(p,T)[1-Z_p(p,T)]-1}{\kappa(p,T)[1+Z_T(p,T)]}} \quad (17)$$

Aus Gleichung (17) ist sehr leicht ersichtlich, dass die Berechnung der gesuchten Endtemperatur bei gegebener Anfangstemperatur  $T_1$  und Anfangsdruck  $p_1$  sowie Enddruck  $p_2$  nicht so ohne weiteres möglich ist. Der Grund liegt in der starken Druck- und Temperaturabhängigkeit der gasspezifischen Größen  $\kappa(p,T)$ ,  $Z_p(p,T)$  und  $Z_T(p,T)$ .

Grundsätzlich gibt es nun zwei Möglichkeiten dennoch die Endtemperatur mit hinreichender Genauigkeit zu berechnen. Die erste Möglichkeit wurde in Teil I dieses Beitrags bereits eingehend erläutert. Dabei werden die Verläufe der gasspezifischen Größen zunächst in sinnvolle Segmente unterteilt. Anschließend können die Kurvenverläufe dieser Segmente über Polynome höherer Ordnung approximiert werden. Abschließende Integration dieser Polynomfunktionen und einsetzen in die Endgleichung führt schließlich zur gesuchten physikalischen Größe.

Diese Methode ist jedoch recht umständlich und schöpft die Möglichkeiten der numerischen Mathematik und moderner Softwaretools nicht vollkommen aus.

Eleganter ist es die gasspezifischen Größen, wie hier beispielsweise die Isentropenexponenten  $\kappa(p,T)$  sowie die Gradienten  $Z_p(p,T)$  und  $Z_T(p,T)$  des Realgasfaktors, in dreidimensionalen Kennfeldern abzubilden (vergleiche Abbildungen 6–11). Ein entsprechend definierter Berechnungsalgorithmus durchläuft in beliebig festzulegender Schrittweite die Berechnungsvorschrift bzw. –gleichungen, wobei interaktiver Zugriff auf die relevanten Kennfelder jederzeit gegeben ist. Auf diese Weise wird in beliebig kleiner

Schrittweite die gesuchte Temperatur berechnet. Durch die Darstellung eines jeden Berechnungsschrittes ergibt sich wiederum ein dreidimensionales Kennfeld für die isentrope Expansion über frei definierbare Druck- und Temperaturbereiche. Bild 12 und Bild 13 zeigen derartige Kennfelder exemplarisch für Methan und für Wasserstoff.

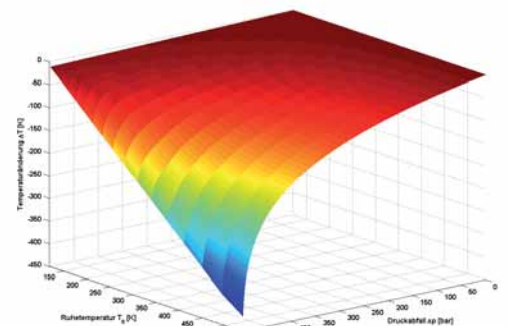


Bild 12 Darstellung der Temperaturänderung der isentropen Expansion von Methan

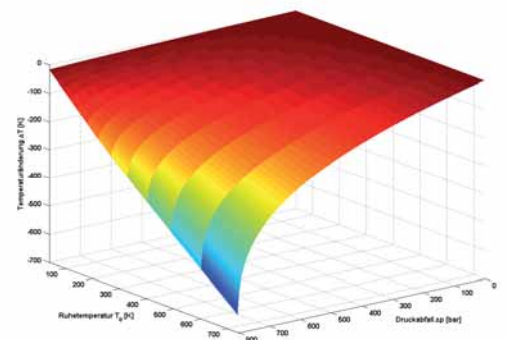


Bild 13 Darstellung der Temperaturänderung der isentropen Expansion von Wasserstoff

Zum besseren Verständnis der angewandten Berechnungsalgorithmen sind die Flussdiagramme (Abbildungen 14 und 15) für isentrope und isenthalpe Expansion zu betrachten.



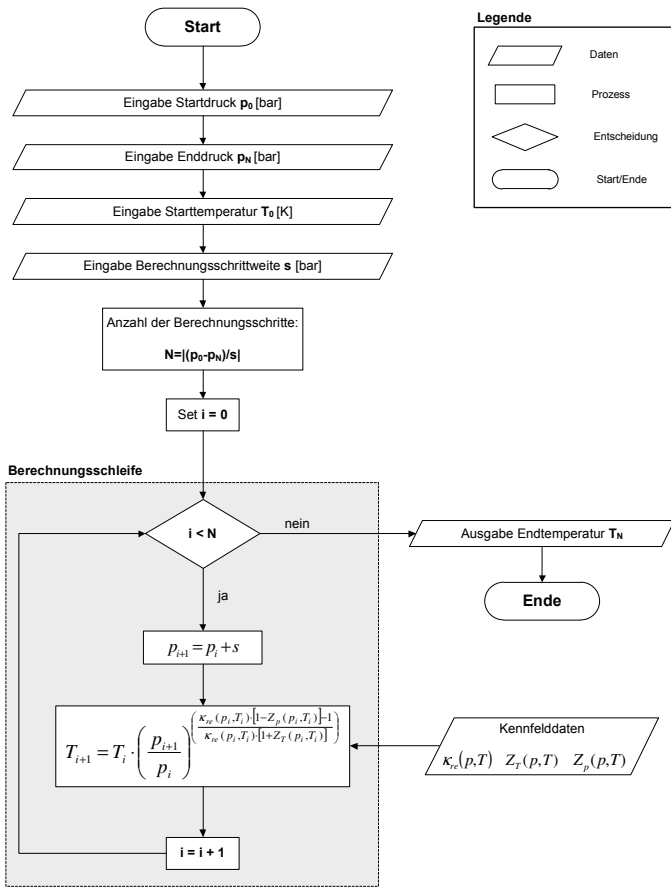


Bild 14 Flussdiagramm – Berechnungsalgorithmus bei isentroper Expansion

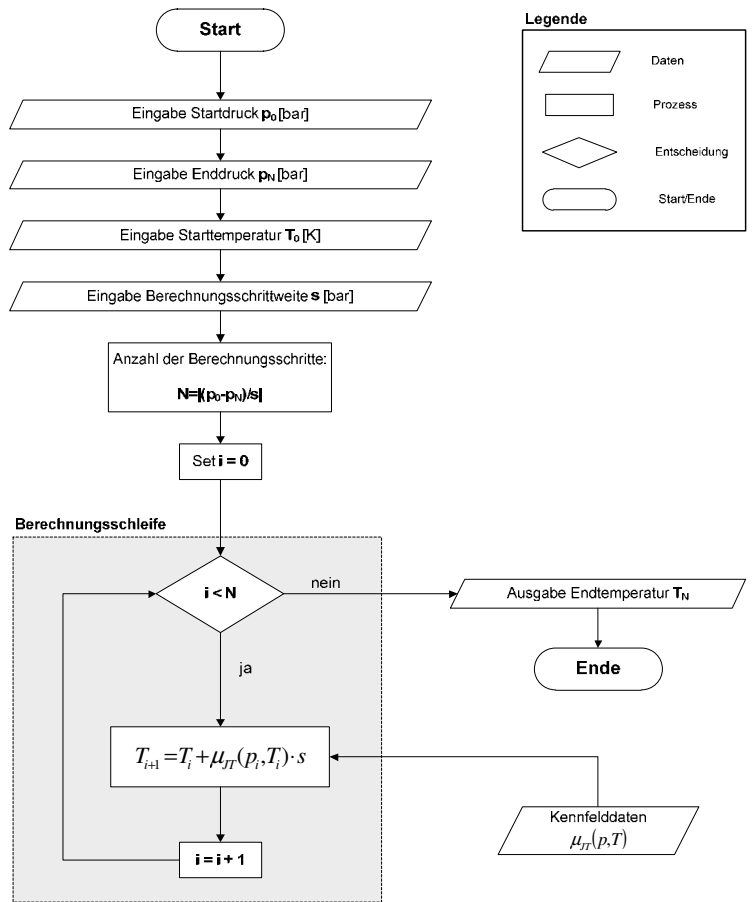


Bild 15 Flussdiagramm – Berechnungsalgorithmus bei isenthalper Expansion

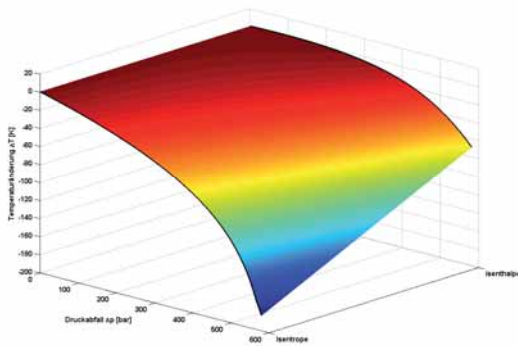


Bild 16 Vergleich der Temperaturänderung – isenthalpe/isentrope Expansion von Methan bei 350 K Anfangstemperatur

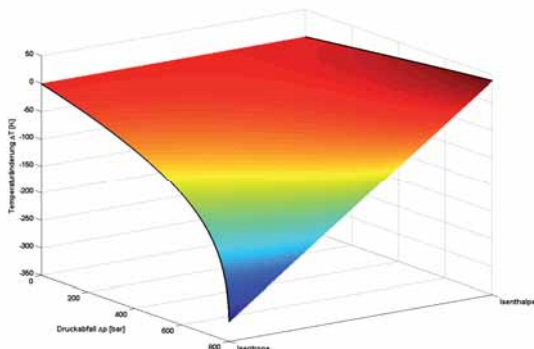


Bild 17 Vergleich der Temperaturänderung – isenthalpe/isentrope Expansion von Wasserstoff bei 350 K Anfangstemperatur

Zuletzt sollen nochmals die Unterschiede bei isentroper und isenthalper Expansion bildlich dargestellt werden. Die Bilder 16 und 17 zeigen exemplarisch für Methan und Wasserstoff jeweils den Verlauf einer Isenthalpen und Isentropen in einem Diagramm für eine Anfangstemperatur vor Expansion von 350 K. Die wahre thermodynamische Zustandsänderung bei einer Expansion liegt zwischen diesen beiden Extremen. Zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs wurde deshalb in den Diagrammen zwischen den beiden Extremzustandsänderungen eine Fläche aufgezogen. Wie bereits beschrieben, definieren die Randbedingungen der Gasentnahme, welche der beiden Extreme bei der Berechnung angesetzt werden sollte.

Erwähnenswert ist das Phänomen, dass sich Wasserstoff bei isenthalper Zustandsänderung geringfügig erwärmt und bei isentroper Zustandsänderung sehr stark abkühlt. Deshalb sind bei Temperaturberechnungen für komprimierten Wasserstoff die Randbedingungen exakt zu evaluieren, damit man die korrekten Ausgangsbedingungen definieren kann. Bei Methan sind die Unterschiede zwischen der Isentropen und Isenthalpen durchaus vorhanden, aber längst nicht so ausgeprägt wie beim Wasserstoff.

**Zusammenfassung**

Mit der vorgestellten Berechnungsmethode und den hergeleiteten Berechnungsgleichungen lassen sich sehr schnell und effizient Temperaturänderungen realer Gase bei isentroper und isenthalper Expansion über große Druckbereiche mit angemessener Genauigkeit berechnen.

Da bisher keine geeigneten Berechnungsmethoden existierten, die es erlaubten die Temperaturänderungen realer Gase bei den o.g. thermodynamischen Zustandsände-

rungen über sehr große Druckbereiche exakt zu berechnen, schließt die vorgestellte Berechnungsmethodik eine vorhandene Lücke. Bei den zur Zeit diskutierten Speicherdrücken von bis zu 700 bar für unterschiedliche Anwendungen Technischer Gase sind derartige Berechnungsmethoden unerlässlich.

Die exakte Berechnung der Temperaturänderung bei isentroper und isenthalper Zustandsänderung dient als Ausgangsbasis für die Gestaltung des richtigen Gasmanagementsystems, da ggf. große Temperaturschwankungen durch zusätzlichen gerätetechnischer Aufwand kompensiert werden müssen, um Fehlfunktionen, kritische Betriebszustände oder gar Worst-Case-Szenarien zu vermeiden.

Aufgrund des wachsenden Interesses der Industrie und damit der Ingenieurwissenschaften an dieser Thematik,

wurden in letzter Zeit bedauerlicherweise vermehrt Fachbeiträge publiziert, insbesondere im World-Wide-Web, die die physikalischen Zusammenhänge realer Gase nicht korrekt bzw. vollkommen falsch wiedergeben. Sollten sich Anwendungen mit diesen extrem hohen Speicherdrücken in Zukunft flächendeckend durchsetzen, und danach sieht es zur Zeit aus, wäre es wünschenswert, wenn sich mit der Thematik beschäftigte Experten detailliert mit den korrekten physikalischen Gegebenheiten vertraut machen. Insofern leistet dieser Fachaufsatz hoffentlich einen bescheidenen Beitrag dazu.

Dr. Thomas ANDREAS

[www.rotarex.com](http://www.rotarex.com)

#### Formelzeichen/physikalische Einheiten

$c$	Strömungsgeschwindigkeit des Gases	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$p$	Druck	$[\text{Pa}], [\text{bar}]$
$R_i$	spezifische Gaskonstante	$\left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
$s$	spezifische Entropie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$T$	Temperatur	$[\text{K}]$
$v$	spezifisches Volumen	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Z$	Realgasfaktor	$[-]$
$Z_p(p, T)$	Steigungsgradient des Realgasfaktor bei konst. Temperatur	$[-]$
$Z_T(p, T)$	Steigungsgradient des Realgasfaktor bei konst. Druck	$[-]$
$\kappa(p, T)$	Realer Isentropenexponent	$[-]$

#### LITERATUR

- 1\_ Andreas, Th.: Ein Beitrag zur Gestaltung von Gasmanagementsystemen mit mechatronischen Systemkomponenten zum effizienten Einsatz alternativer Energieträger in Kraftfahrzeugen, Dissertation, Fachgebiet Mechatronik, Technische Universität Ilmenau, 2008
- 2\_ Atkins, P.: Physikalische Chemie, Wiley-VCH, 3. Auflage, 2001
- 3\_ N. N.: Handbook of compressed gases, Compressed Gas Association, Inc., Fourth Edition, 1999
- 4\_ N. N.: Encyclopedie des Gaz, Elsevier / L'Air Liquide, First Edition, 1976
- 5\_ Rist, D.: Dynamik realer Gase, Springer Verlag, 1. Auflage, 1996
- 6\_ Schön, H.: Handbuch der Reinsten Gase, Springer Verlag, 1. Auflage, 2004



## EVA

ENVIRONNEMENT ET  
AGRO-BIOTECHNOLOGIES



## ISC

INFORMATIQUE, SYSTEMES  
ET COLLABORATION



## SAM

SCIENCE ET ANALYSE  
DES MATERIAUX



# CRP - GABRIEL LIPPMANN

**TROIS DÉPARTEMENTS**  
**AU SERVICE DE VOTRE INNOVATION**

Acteur majeur de la recherche scientifique et du transfert de technologie au Luxembourg, le CRP-Gabriel Lippmann met à votre service ses compétences de haut niveau et ses technologies de pointe.

Die Ressourcen der Erde und die Belastung der Umwelt sind begrenzt. Die Wirtschaft sucht aus diesem Korridor einen Ausweg, indem sie sich an der Forstwirtschaft orientiert, die sich in ihren Anfängen einem ähnlichen Dilemma gegenüber sah, als sie die Gefahr des Raubaus erkannte und das Gebot der stetigen Holzerzeugung erließ, wofür sie den Begriff der Nachhaltigkeit prägte. Zur Schonung von Ressourcen und Umwelt führt die Wirtschaft heute effiziente und erneuerbare Technologien ins Feld.

Wie man mit Formholzprofilen die Materialeffizienz steigert

## HOLZ IN BESTFORM\_

Prof. Dr.-Ing. Peer Haller

In der Auseinandersetzung um nachhaltige Entwicklung versäumt es die Holzwirtschaft nicht, auf die Vorzüge ihres Rohstoffes hinzuweisen: nachwachsend, umweltfreundlich, mit wenig Kraft und Energie bearbeitbar, recycelbar oder leicht zu entsorgen. Ein Muster in Sachen Nachhaltigkeit.

Wie aber ist es mit der Effizienz bestellt? Die Analyse des Stoffstromes entlang des Weges vom Baum zum Bau zeigt: es steht nicht zum Besten damit. Die Tatsache, dass der gesamte Baum verwertet wird, darf nicht darüber hinweg täuschen, dass beim Nadelholz nur grob die Hälfte, beim Laubholz kaum ein Zehntel seine Bestimmung im Bauwesen finden. Dem Verschnitt gelingt dies ebenfalls nur zu geringem Teil und zu niedrigem Preis über den Umweg als Holzwerkstoff.

Der Wald ist nicht nur einer der größten, sondern auch einer der günstigsten Stoffproduzenten der Erde, und es ist schwer einzusehen, dass ein Rohstoff, der mit Hilfe von Sonnenenergie nachwächst, von Materialien preislich unterboten werden kann, zu deren Herstellung sehr viel Kapital und Energie aus fossilen Rohstoffen benötigt wird. Die Voraussetzung hierfür – Wasser und Sonne – steht auch kommenden Generationen reichlich zur Verfügung.

Das Selbstverständnis des runden oder rechteckigen Querschnitts verstellt den Blick auf dessen geringe Ressourcenproduktivität. Vergleicht man diesbezüglich Schnittholz mit technischen Profilen ergibt sich ein Verhältnis von 1:15, das sich einerseits aus dem Verschnitt im Sägewerk und andererseits aus dem geringen Flächenmoment des Vollquerschnitts zusammensetzt. Mit anderen Worten: die Wettbewerbsfähigkeit des Rohstoffes Holz ist an sich ausgezeichnet, sie geht jedoch bei der Transformation des Stammes in Querschnitte verloren. Demzufolge muss ein technischer Querschnitt drei Bedingungen zu erfüllen: Er darf in Längs- und Querrichtung nicht durch die Baummaße begrenzt werden. Er muss effizient sein, das heißt ein großes Flächenmoment bei kleinem Flächeninhalt aufweisen. Und er muss in einem preiswerten Massenproduktionsverfahren herstellbar sein.

Schnittholz erfüllt die beiden ersten Bedingungen nicht, Leimholz nicht die beiden letzten. Anders das Formholz, das an der TU Dresden entwickelt wurde. Es beruht auf einer neuen Betrachtungsweise des Holzes als zelluläres Material und erfüllt alle drei genannten Bedingungen.

Dass Holz ein leicht zu bearbeitendes Material sei, ist eine weit verbreitete Meinung. Das Gegenteil trifft jedoch zu! In der Tat kann man Holz mit wenig Kraft und Energie zerspannen, diese Form der Bearbeitung ist aber im Vergleich zur Umformung weit weniger wirtschaftlich und mit Verschnitt verbunden. Voraussetzung für spanlose Verfahren ist eine hohe Bruchdehnung, die mit Hilfe von Wärme noch erhöht werden kann. Holz ist dazu mit einer Bruchdehnung von nur etwa einen Prozent zu spröde.

Profile und Schalen aus Formholz basieren auf einem neuen Materialverständnis, das Holz als zellulären Stoff begreift, der sich unter Wärme (140°C) und Druck (5 MPa) stauchen lässt, wobei sich die Zellwände zusammenfallen. Von nicht geringerer Bedeutung, aber derzeit ohne technische Nutzung, ist die Tatsache, dass sich die Zellstruktur bei geeignetem Prozessregime wieder vollständig auseinander ziehen und fixieren lässt. Damit lässt sich eine Bruchdehnung von 100% erreichen, was eine Erhöhung um zwei Zehnerpotenzen darstellt.

Die Zellstruktur lässt somit eine neue Betrachtungsweise des Holzes als «schaumstoffartiges» Material zu, das nun leicht bearbeitet werden kann. Nadel- und Laubholz sind gleichermaßen geeignet.

Ausgehend von diesen Überlegungen, wurden am Institut für Stahl- und Holzbau massive Platten aus verdichteter Fichte hergestellt, die danach wiederum unter Wärme und Feuchtigkeit zu Profilen umgeformt wurden. Dabei wird die Faltung der Zellwände wieder rückgängig gemacht. Der Krümmungsradius des Profils hängt von der vorherigen Verdichtung ab. So darf bei einer Verdichtung von 50% das Maß des inneren Krümmungsradius die Wanddicke des Profils nicht unterschreiten. Im Prinzip sind auf diese Weise alle abwickelbaren Formen in beliebiger Längs- und Querabmessung herstellbar.



Kohlefaserbewehrte Formholzprofile, Peer Haller et al. 2009, Technische Universität Dresden, Foto: L. Sprenger



Formholzprofile, Peer Haller et al. 2007, Technische Universität Dresden, Foto: L. Sprenger

Formholzrohre können nachträglich mit Hochleistungsfasern verstärkt werden. Dieser Verbund öffnet dem Holz neue Anwendungsgebiete in Bauwesen und Architektur aber auch im Leicht- und Anlagenbau. Die Rohre können nicht nur tragend sondern auch führend insbesondere zum Transport aggressiver Medien eingesetzt werden. Angesichts der hohen Festigkeit der Fasern können Bauaufgaben realisiert werden, die heute energieintensiven Materialien vorbehalten sind. Synthetische Fasern weisen höhere Festigkeiten auf als Metalle: Bei nur einem Fünftel des Gewichtes erzielen sie die 20-fache Materialfestigkeit! In Kombination mit dem preiswerten aber dennoch festen Holz entstehen Bauteile, deren Preis und Funktion sich allen Bauaufgaben gewachsen zeigen. Neben der Verstärkung stellen textile Bewehrungen einen wirksamen Schutz gegenüber der Witterung dar, so dass bei Außenanwendungen eine signifikante Verbesserung der Dauerhaftigkeit vorliegt und die Lebenszyklusanalyse noch günstiger ausfällt.

Zur besseren Einschätzung des Tragvermögens sei folgendes Beispiel angeführt: Die Tragfähigkeit einer Rohrstütze aus Formholz (260 cm lang, 30 cm Durchmesser bei 2 cm Wandstärke) beträgt etwa 600 kN (was einem Gewicht von 60 Tonnen entspricht).

Eine zusätzliche äußere Glasfaserbewehrung von nur 750 g (!) steigert die Tragfähigkeit auf 1200 kN, also um das Doppelte! Das entspricht dem 4000-fachen des Eigengewichts oder einhundert übereinander gestapelten Autos! Der Materialpreis des Formholzrohres beträgt nur 15 Euro, derjenige der Bewehrung ist je nach Fasertyp etwas (Kohle-) oder deutlich (Glasfaser) geringer. Diese Zahlen unterstreichen die Leistungsfähigkeit aber auch die Wirtschaftlichkeit, welche die Ressource Holz in Verbindung mit High-Tech erzielt.

Allein die Einsparungen des Verschnitts im Sägewerk sowie die Effizienzsteigerung durch die Profilbildung belaufen sich auf bis zu 80% bezogen auf das Rohholz. Bilanziert man die Effizienzsteigerungen des Formholzes ergibt sich folgendes Bild: Vermeidung des Verschnitts im Sägewerk - Faktor 2; Profilbildung - Faktor >4; Verwendung von verdichtetem Holz - Faktor >2; Verwendung von fehlerfreiem Holz - Faktor >2. Fasst man diese Faktoren zusammen, er-

gibt sich die vierfache Tragfähigkeit bei einem Achtel des Materialeinsatzes, worin die Steigerung der Traglast durch die Bewehrung mit Hochleistungsfasern noch nicht berücksichtigt ist!

Mittlerweile liegt ein Prototyp einer Produktionsmaschine mit einer Kapazität von 90'000 Rohren pro Jahr vor. Die Maschine ist Teil einer schlüsselfertigen Fabrikplanung, welche die Fertigung beginnend mit der Verdichtung des Schnittholzes, über Fehlererkennung, Formung, Trocknung, Endbearbeitung bis zur Verpackung vorsieht. Optional können auf einer Wickel- oder Flechtanlage die Rohre mit einem zusätzlichen Faserverbund versehen werden. Die wirtschaftlichen Berechnungen eines Anlagenbauers, welche an Hand der Industrieanlage nunmehr gut abschätzbar sind, belegen durch eine Kapitalrendite nach nur 3,5 Jahren das Marktpotenzial dieser Technologie.

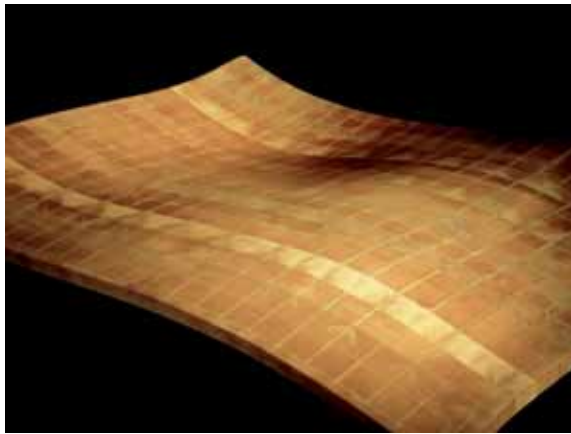
Hohe Tragfähigkeit und Leichtigkeit infolge Profilbildung und Faserbewehrung lassen ein großes Potenzial in Bauwesen, Architektur, Leicht- und Anlagenbau sowie im Möbelbau erkennen. Das Rohr ist eine elementare technische Form, welche auch zum Transport von Flüssigkeiten oder Schüttgütern verwendet werden kann. Wir konzentrieren uns noch auf diese Form, wohlwissend, dass das Verfahren eine Fülle alternativer Profile ermöglicht mit keineswegs geringerem Marktpotenzial.

Folgt man bei der Bewertung einer Technologie dem Philosophen Kant, der Wichtigkeit als Größe und Vielheit der Folgen definiert, so ergeben sich bei der Formholztechnologie weitreichende Konsequenzen in Architektur und Bauwesen und darüber hinaus:

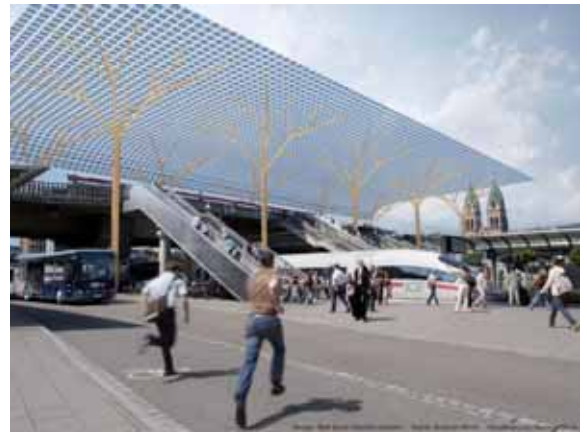
### 1. Formholz und Waldbau

Die Eindimensionalität der Sägetechnologie favorisiert mit Blick auf die Ausbeute „eindimensionale“ Baumarten. Dies hat Nadelhölzern im Zuge von Wiederaufforstungen den Vorzug gegenüber standorttypischen Laubholzarten gegeben, deren mächtige Kronen zu minderwertigem Industrie- und Brennholz verarbeitet werden.

Formholz stellt geringe Anforderungen an die Waldmaße und unterstützt somit den naturnahen Waldbau. Es können alle heimischen Baumarten und selbst Bestandteile



Formholzschale, Peer Haller et al. 2010, Technische Universität Dresden, Foto: L. Sprenger



Solardach Freiburg HBF, Entwurf Rolf Disch, Solararchitektur

der Kronen verwertet werden. Auch profitieren waldreiche Entwicklungsländer, da der Laubwald dort vielerorts naturnah geblieben ist und krumme Stämme aufweist, die als tragende Teile aus Formholz energieintensive Materialien substituieren können.

## 2. Formholz und Agroforstplantagen

Schnellwüchsige Baumarten wie etwa Pappel, welche nach nur zehn Jahren in Kurzumtriebsplantagen geerntet werden, eignen sich bestens zur Herstellung großformatiger Formholzrohre. Wirtschaftliche und ökologische Gesichtspunkte der Agroforstplantage sind derzeit Gegenstand vielschichtiger Untersuchungen. Die Verarbeitung des Holzes zu Formholzrohren erschließt den Landwirten neue Einnahmequellen.

## 3. Formholz und Energie

Häufig werden von der Holzbranche, welche sich selbst den Verbrauch geringer Mengen Energie zugute hält, die Energiekosten des Umformprozesses den Holzeinsparungen entgegengehalten. Aus wirtschaftlicher Sicht ist dies jedoch unbegründet. Der Energieeinsatz bei der Formholzherstellung ist verglichen mit anderen Materialien so gering, dass die dafür erforderlichen Kosten nicht ins Gewicht fallen. Der Heizwert des eingesparten Holzes gegenüber der Prozessenergie spricht hier eine deutliche Sprache. Im Gegensatz zur irreversiblen mechanischen Zerfaserung bei der Herstellung von Holzwerkstoffen, für welche elektrische Energie geringen Wirkungsgrades aus Primärenergie bereitgestellt werden muss, lässt sich beim Formholz die Prozesswärme über Wärmetauscher wieder zurückgewinnen. Gebraucht Formholz kann bei der Entsorgung stofflich und thermisch verwertet werden.

Darüber hinaus besteht in der Fachwelt Einigkeit darüber, dass die stoffliche der energetischen Verwertung vorzuziehen ist. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass der Material- gegenüber der Energieeffizienz ein höherer Stellenwert eingeräumt werden muss.

## 4. Formholz und Wirtschaft

Die Formung von Holzprofilen stellt einen Paradigmenwechsel dar, dessen Auswirkung auf Wirtschaft und Umwelt unübersehbar ist. Zurzeit konzentriert sich die Entwick-

lung auf das Rohr, da es eine sehr elementare und technisch vielseitig einsetzbare Form darstellt. Aber auch alternative Profile und Formschalen, wie sie von einem deutschen Automobilhersteller mit einem Innovationspreis ausgezeichnet wurden, weisen wirtschaftliche Potenziale auf, die in ihrer Dimension nur erahnt werden können.

## 5. Formholz und Umwelt

Die Umweltleistung eines textilbewehrten Formholzrohres ist wegen der wesentlich geringeren Masse besser als ein verleimtes Schichtholz gleicher Tragfähigkeit; das Formholzrohr ist jedoch wesentlich vielfältiger und dauerhafter einsetzbar. Ein entsprechendes Stahlprofil bzw. eine hohle Stahlbetonstütze verursachen ein 80-faches CO<sub>2</sub> – Äquivalent wie Untersuchungen des Lehrstuhles für betriebliche Umweltökonomie zeigten.

Kriterium	Einheit	Baustoff		
		Formholz (KFV)	Stahl	Stahlbeton (hohl)
Gewicht	kg	28.2	29.75	154.5
Energie	MJ	140.7	723	328.8
Klima GWP	kg CO <sub>2</sub> e	0.40	32.2	32.5
Versauerung	kg SO <sub>2</sub> e	0.19	0.12	0.13

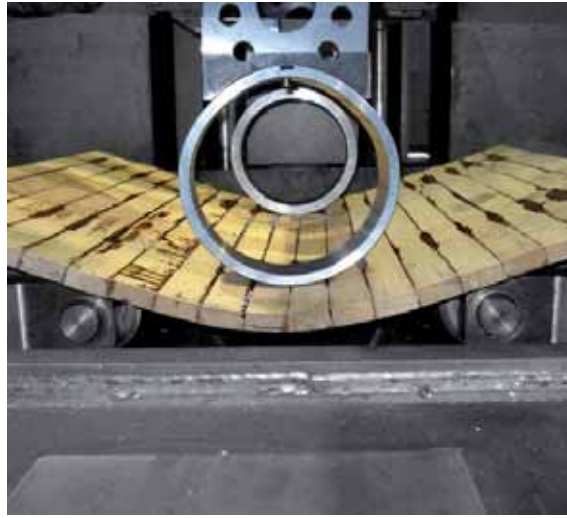
Tabelle: Umweltvergleich: Funktion: Stütze von 2.5 Meter Länge und 500 kN Tragkraft; GWP Global Warming Potential

Quelle

C. Manthey, E. Günther, A. Heiduschke, P. Haller, M. Veljkovic, P. Hajek et al. 2009, Structural, economic and environmental performance of fibre reinforced wood profiles vs. solutions made of steel and concrete, proceedings COST C25 Sustainable Construction; Hrsg. L. Braganca et al.; Verlag Orizonturi Universitare; Timisoara; Romania; 2009)

Fazit

Die Herstellung von Formholzprofilen beruht auf einem neuen Verfahren, welches Holz als zelluläres Material auffasst, das unter Wärme und Druck verdichtet, umgeformt und fixiert werden kann. Technologisch betrachtet erfolgt damit erstmalig die Herstellung eines tragenden Quer-



Umformung zum Rohr

schnitts in einem thermo-hygro-mechanischen Prozess. Konstruktiv gesehen stellen Profilquerschnitte eine Abkehr von den Vollquerschnitten dar. Diese weisen im Vergleich zu technischen Profilen aus Metallen oder Kunststoffen eine geringe Materialeffizienz auf, bei der die hohen Verluste im Sägewerk und Holzleimbaubetrieb noch nicht berücksichtigt sind.

Die Entwicklung faserbewehrter Formholzprofile greift die Vorstellungswelt von Ingenieuren und Architekten auf, indem sie einen effizienten Querschnitt hoher spezifischer Tragfähigkeit und Steifigkeit bereitstellt, dessen anisotrope Struktur und Dauerhaftigkeit durch die Bewehrung in weiten Grenzen maßgeschneidert werden kann. Die Kombination beider Materialien führt zu neuen Konstruktionen in Architektur, Bauwesen und Leichtbau. Höchste Leistungsfähigkeit bei geringem Gewicht und Preis schaffen ein erhebliches Marktpotenzial für Formholzprodukte, welche energieintensive Materialien und Bauweisen substituieren können. Der weltweit nachwachsende Rohstoff Holz wird dadurch einen weit größeren Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten können.

#### Literatur

- Haller, P.; Concepts for textile reinforcements for timber structures; *Materials and Structures*, (2007), 40: 107-118
- Haller, P.; Von der Massivholzplatte zum Formholzrohr; *Holzzentralblatt*, Nr. 2, 2008, S. 32
- Cabrero, J. M. ; Heiduschke, A. ; Haller, P.: Analytical assessment of the load carrying capacity of axially loaded wooden reinforced tubes. In: *Composite Structures* 92 (2010), S. 2955-2965
- Heiduschke, A.; Haller, P.; Zum Tragverhalten gewickelter Formholzrohre unter axialem Druck. *Bauingenieur* 84 (6) (2009): 262-269
- Heiduschke, A. ; Haller, P.: Fiber-Reinforced Plastic-Confined Wood Profiles under Axial Compression. In: *Structural Engineering International* 20(3) (2010), S. 246-253
- Kaltenbach, F.; Gekrümmte Flächen im Innenraum Material, Herstellung, Wirkung; *Curved Surfaces in Internal Spaces Materials, Execution, Appearance; Detail*, 4 (2012), 356-370

Les contraintes de l'outil de production peuvent imposer la réalisation du carnet par groupes de produits. La méthode de mise en campagnes préconisée étant originale, l'exposé n'allait pas sans entrer dans les fondements théoriques des procédures.

# CAMPAGNES DE PRODUCTION\_

Ing. dipl. Henri Muller

## Mise en charge

Commençons par rappeler la façon dont, en l'absence de contraintes particulières, il y a lieu de confectionner un échéancier (cf. REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE, n°3 Juillet-septembre 2007: H. Muller, «Global Order Management»).

Considérons une installation de production constituée d'une seule "unité de production". En fait, elle est nécessairement suivie d'une deuxième unité, de "l'unité d'expédition". Cette dernière peut être imaginée aussi puissante qu'on le veut, ce qui réduit à zéro les contraintes qu'elle pourrait exercer sur la programmation de la production. Ainsi, la programmation est déterminée par la seule première unité. L'ensemble est censé pouvoir "réaliser" toute une gamme de "produits" divers. La production procède par "lots". Un lot est un ensemble d'objets interchangeable (ou suffisamment semblables), destinés à un même client, réalisés d'affilée et expédiés de concert à une même date. Les tailles et les prix de vente des lots sont quelconques, leurs dates de réalisation se répartissant suivant les besoins de la clientèle et suivant les échéances accordées. Les différents lots sont libres de se suivre dans n'importe quel ordre. Dans la mesure du possible, les dates de réalisation, c'est-à-dire d'expédition, sont fixées par le client. Si nécessaire, les nouvelles commandes à inscrire sont insérées parmi celles inscrites auparavant. A cet effet, ces dernières peuvent être avancées (en aucun cas reculées), ce qui créera des stocks d'attente entre réalisation et expédition. C'est le prix à payer pour «charger» l'installation à son maximum, réalisant à la limite une "charge compacte", au moins sur une certaine étendue de l'échéancier. Quant aux préséances, dans tous les cas, la date de réalisation finalement fixée prime sur la date à laquelle l'inscription s'est faite. Par ailleurs, l'échéancier est censé être strictement compatible avec les capacités de production disponibles.

En toute généralité, un objet industriel est élaboré en subissant successivement une série "d'opérations", effectuée chacune par une unité de production spécialisée. Par unité et par lot, toute opération est caractérisée par deux paramètres clefs: par son "temps de production" et par sa "durée d'élaboration". Le temps de production correspond au

temps d'immobilisation de l'unité occupée à la confection du lot; la durée d'élaboration est le temps d'immobilisation du lot lui-même, c'est-à-dire son temps de non disponibilité momentanée pour toute opération autre que celle en cours. Bien que, à la limite, les deux paramètres puissent avoir les mêmes valeurs numériques, ils sont de nature fondamentalement différente, l'un étant une variable de quantité, l'autre, de tension. Un four tunnel de poterie, débitant des théières à raison de 60 rangées de douze par heure, prend, par théière, un temps de production moyen de 5 secondes, alors que la durée d'élaboration d'une théière (cuisson proprement dite + refroidissement en dehors du four) y est de 30 heures, par exemple. La «charge» d'une unité de production est la somme des temps de production de tous les lots destinés à y être traités pendant une période donnée. Les durées d'élaboration sont les intervalles minimaux qui séparent les opérations successives subies par un même lot. Leurs allongements accidentels ou délibérés au-delà de leurs minima respectifs mènent à la création de stocks d'attente, qui, en tant que stocks tampons (= «marges de sécurité»), peuvent être voulus.

## Mise en production par campagnes de tailles optimales

Les différents types de produits qui passent par une unité de production donnée peuvent y demander chacun un outillage particulier (cannelures, moules de cuisson, ...), dont la mise en place, plus ou moins coûteuse, est, de surcroît, susceptible de réduire sensiblement la capacité de production de l'unité. Dans ce cas, il peut y avoir avantage à procéder à la mise en production par groupes de produits. Chacun des différents groupes ou « produits » a ses propres «campagnes» de mise en fabrication. Comment, dans ces conditions, établir un programme de production rationnel, malgré les incertitudes commerciales quant aux types, aux volumes et aux cadences d'entrée des commandes à venir? Nous commencerons par supposer avoir pu mettre au point des modalités d'inscription des commandes tenant dûment compte d'emblée des contraintes imposées par les mises en campagnes, de sorte à pouvoir – au moins formellement – les ignorer lors de la mise en charge de l'unité. Au gré des entrées et des disponibilités, les lots se retrouveront éparpillés le long de l'échéancier, indépendamment de leur appar-



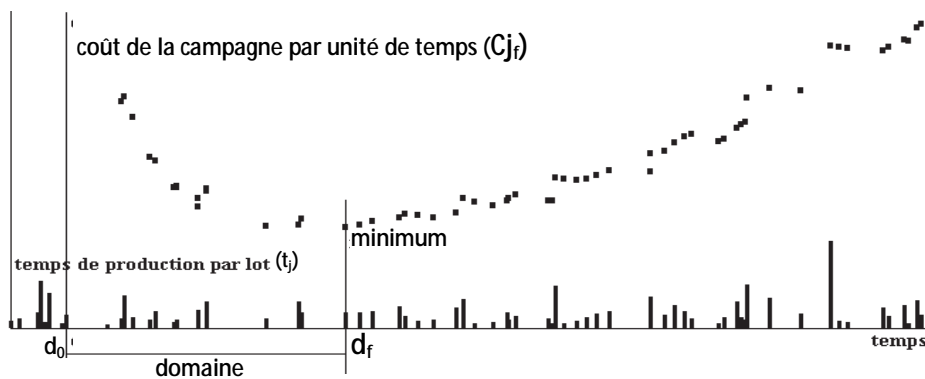


Figure 1.

tenance à l'un ou l'autre groupe. Comment, par la suite, rassembler les différents produits en campagnes respectives; quelles seront les tailles optimales de celles-ci?

Les bâtonnets de la figure 1 représentent, pour l'unité de production considérée, la charge due aux lots d'un des groupes (i. e. d'un des produits) parmi toutes les commandes qui vont y être élaborées. Chaque campagne couvre son «domaine»; elle englobe tous les lots et rien que les lots du produit considéré, du moment que leurs dates de réalisation sont situées entre les dates limites du domaine. Comme, par hypothèse, l'étendue d'un domaine est de loin supérieure à la durée de sa campagne, dans un premier temps, par souci de simplicité, les campagnes seront réduites à des points. Sous peine de retards (ou d'avances non justifiées), toute campagne doit se situer au point de départ du domaine qu'elle couvre. Construisons, pour le produit de la figure 1, une campagne optimale, située en  $d_0$ , par exemple. Soient  $j_0$  le premier lot du domaine (au droit de  $d_0$ ),  $j_f$  en étant le dernier (au droit de  $d_f$ ). Un lot intermédiaire  $j$  est réalisé prématurément en  $d_0$  et non en  $d_j$  (date ultime de mise en chantier selon l'échéance convenue avec le client). L'avance ainsi imposée au lot  $j$  par rapport à sa date d'expédition a un coût,  $s_j$ , qui est le produit arithmétique du coût  $c_j$  de son stockage par unité de temps et du supplément de séjour en stock du fait de sa réalisation avant terme pour mise en campagne, soit  $s_j = c_j * (d_j - d_0)$ . Posons  $D = d_f - d_0 =$  étendue du domaine,  $w =$  coût de mise en place d'une des campagnes du produit considéré. De  $d_0$  à  $d_f$ , le coût par unité de temps de la mise en campagne s'élèvera à  $C_j = (w + \sum_j s_j) / D$ , la somme s'étendant de  $j_0$  à  $j_f$ . Comme le montrent les points de la figure 1, pour  $j_f$  se déplaçant vers la droite à partir de  $d_0$ , la fonction  $C_j$  comporte un minimum au droit d'un lot bien déterminé. C'est là que le domaine se termine; la campagne optimale comprendra les lots  $j_0$  à  $j_f$ .

Si les commandes se présentaient en flux continu et uniforme, c'est-à-dire, pour un des produits, par  $q$  unités de quantité par unité de temps, les étendues des domaines optimaux successifs s'exprimeraient par  $D = [(2 * W) / (q * c)]^{1/2}$ . Nous retrouvons la formule de WILSON, bien connue des services d'achat: les commandes répétitives d'un produit donné sont lancées à des intervalles ( $D$  jours, p. ex.) d'autant plus

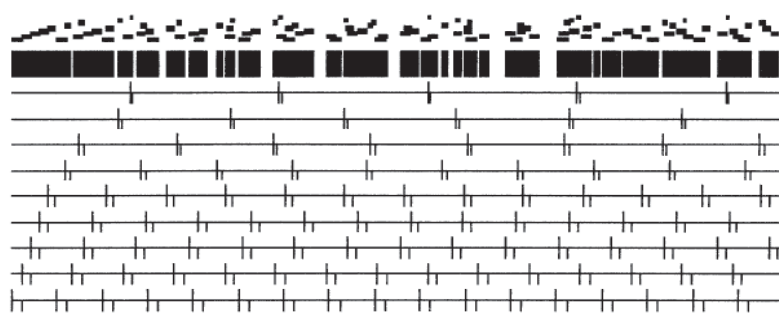
courts que les frais d'appel ( $W$ ) sont bas, les frais de stockage ( $c$ ; ici, par jour par unité de quantité) élevés et les quantités à approvisionner ( $q$  unités de quantité par jour) importantes.

#### Incompatibilité des cycles différenciés

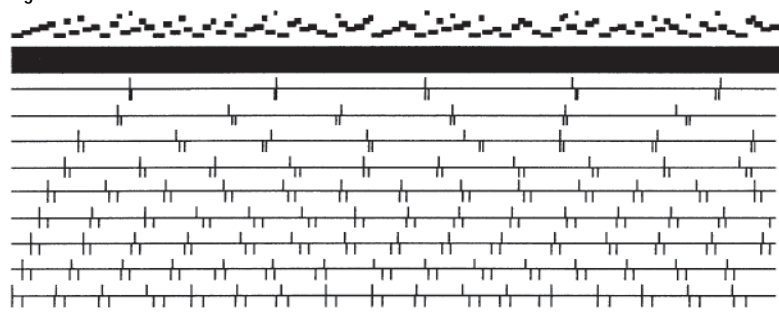
Les quantités représentant la charge de l'unité considérée sont mesurées en termes de temps de production. Les lots (et, par la suite, les campagnes) reprennent leurs véritables étendues et se situent à leurs dates de réalisation respectives. Pour simplifier, nous admettons que la capacité de l'installation est pleinement utilisée – que sa charge est compacte – et que l'entrée des commandes de chaque produit est continue et uniforme. Du fait de ces conditions particulières, la disposition optimale des campagnes devient strictement cyclique.

A la figure 2 sont développés (à partir d'une configuration cohérente des premières campagnes) les cycles réguliers de neuf produits. Les produits 1 à 9 y sont disposés par ordre ascendant; les petits rectangles du haut de la figure représentent chacun une des campagnes. A la large bande tracée ensuite figurent les lacunes que subirait la charge par les chevauchements partiels des campagnes, si de tels chevauchements étaient possibles. Chaque ligne du bas de la figure correspond à un des neuf produits et en donne par campagne la date, la durée et la position par rapport au domaine qu'elle couvre. Ici, par construction, les dates initiales des domaines et des cycles coïncident. Chevauchements et lacunes sont l'expression de l'incompatibilité des cycles optimaux.

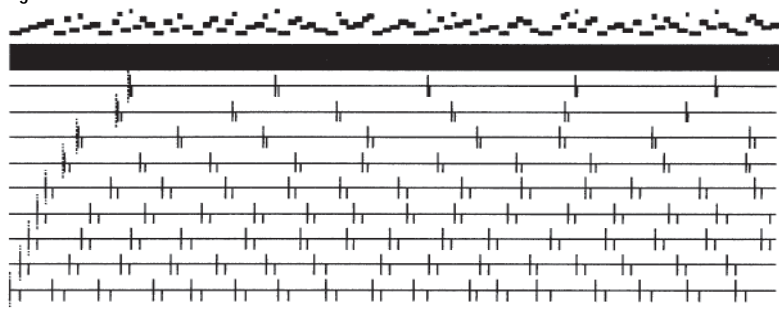
Encore faut-il éliminer ces chevauchements. La figure 3 est déduite de la figure 2 moyennant une procédure dite «étalement et resserrement» ou «lissage» ou encore «compactage». De la gauche vers la droite, les campagnes, tous produits confondus, sont mises bout à bout dans l'ordre de leurs dates de début. La compacité de la charge (v. large trait noir) devient apparente. Cependant, les campagnes et leurs domaines sont plus ou moins décalés, ce qui, pour une partie de lots, causerait des écarts par rapport aux dates de réalisation, c'est-à-dire des retards ou des avances injustifiées. A la figure 4, au prix de cycles irréguliers s'écartant encore davantage de leurs valeurs optimales, ces décalages



**CYCLAGE BRUT**  
Figure 2



**CYCLAGE APRES COMPACTAGE DES CAMPAGNES (SANS ADEQUATION)**  
Figure 3.



**CYCLAGE APRES COMPACTAGE ET ADEQUATION DES CAMPAGNES**  
Figure 4.

sont supprimés par une opération dite «adéquation entre campagnes et domaines». La figure 5 illustre les mécanismes de la procédure. A et B sont deux campagnes consécutives d'un même produit. La partie gauche de la figure 5 concerne un décalage par excès: le domaine total couvert

par l'ensemble des campagnes précédant B dépasse la date de début de B. A droite, la situation est inverse. Comme le montrent les traits gras, à gauche, une légère diminution de taille de la campagne A (v. schéma du dessus) diminue fortement le domaine global des campagnes précédant B (v. schéma du dessous). A droite, de façon analogue, un faible allongement de A fait croître sensiblement la portée de ces campagnes. La procédure ne devant ni faire disparaître ni créer des lots, il s'agit, en fait, de transferts de A vers B ou de B vers A (v. diagrammes). Après chaque transfert, le compactage est à refaire. L'algorithme converge si, par petits pas et à tour de rôle, il est appliqué à toutes les campagnes.

Plus le nombre de produits est élevé, moins l'interdépendance des cycles se fait sentir. En revanche, dans le cas limite de deux produits en tout, par exemple, leurs cycles sont nécessairement égaux, quelles que soient les charges respectives.

#### **Avances / retards, durées d'élaboration / marges de sécurité**

A l'unité de production U, la mise en fabrication groupée de lots qui dans l'échéancier s'échelonnent aléatoirement le long du temps calendaire ne peut que causer des avances et des retards. Comme on veut éviter tout retard, en vertu de la loi de stricte équivalence entre avances et retards au sein d'une charge compacte, tous les lots seront délibérément réalisés avant terme, à l'exception de ceux, rares, qui le sont exactement au moment prévu. Tout lot faisant partie d'un produit à production groupée y subira au cours de sa campagne une avance pondérée moyenne (pondération par la taille du lot, c.-à-d. par son temps de production en U). Le retard qui en résulte est compensé par une marge de sécurité correspondante. La durée d'élaboration en U du produit concerné sera prolongée d'autant. Par l'introduction d'une marge de sécurité M générale (marge pour mise en campagnes «passe-partout» qui correspond à l'avance moyenne subie par l'ensemble des produits du fait de leurs groupements par campagnes) l'échéancier devient unique. La gestion de l'échéancier s'en trouve grandement simplifiée: à l'existence de la marge de sécurité commune près, valable pour tous les produits, les lots, sans distinction, peuvent

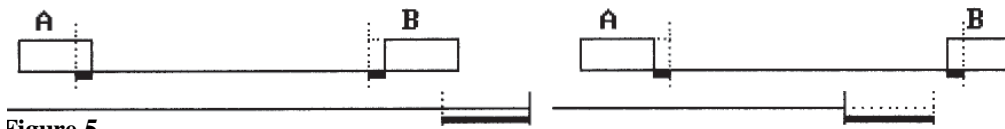


Figure 5.

effectivement être enregistrés comme si la contrainte de la mise en campagnes n'existait pas. Soit, pour un produit  $p$ ,  $H_p$  la durée moyenne des campagnes prévues en  $U$  au cours de la période de programmation.  $M = \frac{1}{2} * \sum_p (H_p)$  est alors la meilleure estimation de la valeur minimale du  $M$  qui corresponde à l'ensemble des campagnes programmées. En effet, admettons que, en moyenne, les produits soient uniformément répartis et que le produit  $p$  prenne une part  $r_p$  % du temps de production total disponible. Ses avances allant de 0 à  $D_p$  (étendue moyenne de ses domaines), son avance moyenne par campagne s'élève à  $\frac{1}{2} * D_p$ , sa part pondérée dans l'avance globale à  $M_p = \frac{1}{2} * D_p * r_p$ . Or, dans ces conditions, la durée moyenne des campagnes du produit  $p$ , c'est-à-dire la part du temps de production total disponible qu'elles prennent en moyenne est précisément égale à  $H_p = D_p * r_p$ , d'où  $M_p = \frac{1}{2} * H_p$ . Par ailleurs, le programme futur n'étant pas connu au moment de l'enregistrement des commandes, on en est réduit à admettre une marge passe-partout forfaitaire, qui, l'expérience aidant, sera choisie la plus proche possible de sa valeur minimale (calculable seulement a posteriori). A ce stade, intervient la «loi de la constance de la marge pour mise en campagnes»: en réalité, il s'agit de prolonger un programme existant déjà entamé en lui emboîtant le pas sans causer des retards de livraison, ce qui impose une contrainte au choix de  $M$ . Nous verrons plus loin comment se fera l'adéquation entre nouvelles campagnes et programme en cours. Si changement de  $M$  il doit y avoir, la nouvelle valeur forfaitaire devra être introduite au moment de l'inscription au carnet des commandes concernées.

Le délai uniforme n'est pas d'application à des produits dont les cycles dépasseraient l'étendue de la partie programmable du carnet. Ils sont cyclés à part; devenus autonomes, ils auront respectivement leurs cycles et leurs marges de sécurité propres.

Lors de la mise en campagnes d'une des unités de production, la charge de sa partie programmable risque de ne pas être compacte. Si tel est le cas, pour un nouveau lot à inscrire, les domaines qui correspondent aux campagnes déjà réalisées sur le compte du produit concerné sont interdits à toute nouvelle mise en charge de ce produit.

### Modalités d'application

Reprenons les éléments de coût qui déterminent la mise en campagnes à l'unité de production  $U$ . D'un côté, il y a le surcoût dû aux avances de mise en production des lots ( $FS$  = frais de stockage), de l'autre, les frais de changement de campagne ( $FM$  = frais de montage). Le stockage entraîne des frais de gestion (location du terrain, manutention) et des pertes financières. Quelles que soient les modalités de paiement, la mise en campagnes retarde d'autant le règlement des factures. Par lot, le manque à gagner afférent est proportionnel, d'une part, aux avances encourues, d'autre part, aux montants dus (prix de vente du lot), ainsi qu'au coût de l'argent. Par ailleurs, on peut admettre que les frais de gestion du stock sont, à peu de chose près, eux aussi, proportionnels aux volumes concernés, donc à l'avance moyenne des dates de réalisation des lots par rapport aux dates d'expédition. Manque à gagner et frais de gestion du stock aboutissent, par lot  $j$ , au coût  $c_j$  par unité de temps d'avance (= temps d'attente = temps de stockage). (Le cas de la clientèle prête à enlever sa marchandise avant terme, immédiatement ou peu après la mise à disposition des lots, sera traité plus loin.)

Le calcul sous-jacent au diagramme 1 donne les optima absolus des cycles, qui, entre autres, déterminent la marge de sécurité à prévoir au moment de l'enregistrement des commandes. Par la suite, à cause des fluctuations du mix des produits, la marge est soit insuffisante, soit surdimensionnée. Lors de la confection du programme de mise en fabrication, il faudra adapter les intervalles entre campagnes à une situation de fait qui, en général, diffère de ce qui a été prévu. L'optimum absolu sera approché par un optimum lié. Le paramètre d'ajustement  $u$  permettra de majorer ou de minorer les coûts de stockage par unité de temps:  $c_j = (c_j + u * t_j)$  (avec  $t_j$  = temps de production du lot  $j$ ), et, par là, à faire varier l'étendue des cycles. La bonne valeur de  $u$ , valable pour tous les lots et tous les produits passant par  $U$ , est déterminée par approximations successives de manière à prolonger sans heurts le programme en cours.

Jusqu'ici, les arrêts de production pour ré-outillage ont été passés sous silence. En effet, les dispositifs de changement rapide de l'outil, voire les remplacements en temps mas-

qué, peuvent réduire à zéro les pertes de temps entre campagnes. Si l'unité de production U, qui impose la mise en campagnes, n'est pas le goulet d'étranglement de l'usine, sa capacité excédentaire peut absorber complètement ou en partie les arrêts pour changement d'outillage. Cependant, tel n'est pas toujours le cas. Considérons une charge compacte s'étendant sur un temps T, pendant lequel la perte de temps totale pour mise en campagnes s'élève à Z unités de temps. La capacité de production en U s'en trouve diminuée en proportion, dont, lors de l'enregistrement des lots, il faudra tenir compte en allongeant leurs temps de production. Suivant la valeur de Z, pour le lot j, le temps de production  $t_{0j}$  de pleine capacité passe à  $t_j = t_{0j} * T / (T - Z)$ . L'espacement entre lots et, partant, leur potentiel de mise en stock s'en trouvent modifiés. Comme le Z qui correspond au mix des produits en cours d'enregistrement n'est pas connu à l'avance, on lui attribuera au moment de l'inscription des commandes une valeur empirique forfaitaire. Pour éviter des retards de fourniture ou des avances de production injustifiées, les campagnes optimales sont calculées en fonction du Z imposé. Ici aussi, la contrainte exercée par l'incertitude quant à la valeur de Z mène d'office à un optimum lié (nous reviendrons sur la question de l'optimum absolu). Soit  $z_p$  le temps de montage et de démontage de l'outillage destiné à un produit p donné. Pour une installation à capacité saturée, tout arrêt signifie un manque à gagner unitaire b, qui est le bénéfice moyen réalisé par unité de temps de marche effective pendant la période T. Les frais de montage du produit p en deviennent  $FM_p = w_p + z_p * b$ . Normalement, l'optimisation des campagnes, compte tenu des valeurs des  $t_j$  et  $FM_p$ , n'aboutira pas à la valeur escomptée du Z. La solution sous-optimale sera atteinte par l'introduction d'un paramètre d'ajustement unique v, valable pour tous les produits passant par U, majorant ou minorant b:  $FM_p = w_p + z_p * (b + v)$ . La bonne valeur de v, celle qui correspond au Z imposé, est déterminée par un calcul itératif. Remarquons qu'il n'est pas possible de réaliser à la fois une marge de sécurité M et un temps de montage Z voulus. Quel que soit le choix à cet égard, les retards qui résulteront de cette inadéquation partielle devront être couverts par un supplément de marge.

Quelle eût pu être une valeur forfaitaire Z plus proche de l'optimum absolu  $Z_0$ ? On le saura en calculant le  $Z_0$  relatif au carnet du moment. Celui-ci a été enregistré sur base d'une perte de temps Z, sa charge compacte s'étendant sur la période T. Supposons connue la valeur optimale  $Z_0$ . Toute différence entre Z et  $Z_0$  fera varier et les temps de production des lots et l'espacement entre eux, ainsi que l'étendue de la période, qui, pour les calculs, passe de T à  $T_0$ . Compte tenu de la charge ainsi transformée, l'optimum optimum est établi par un calcul itératif (convergeant rapidement).

Dans tout ce qui précède, la durée des campagnes n'est soumise qu'aux seules contraintes découlant de l'optimisation des cycles et de l'adéquation entre campagnes et domaines de charge. Pour des raisons diverses, ces durées peuvent être bornées vers le haut (tenue de l'outillage, qualité du produit se détériorant au fil d'une campagne, capacités limitées de manutention et de stockage, exigences de la clientèle) ou vers le bas (intervalles minimaux entre campagnes, compte tenu du temps de préparation de l'outillage). Les cycles optimaux ne sont nullement obligatoires. Les tailles des campagnes peuvent être quelconques, résulter de contraintes ou non. Toutes les modalités sont recevables, du moment qu'on est prêt à en payer le surcoût.

Il peut y avoir avantage à rassembler les campagnes de certains groupes de produits en «supergroupes». Cela s'impose si, pour ces produits, le passage à un produit quelconque de leur supergroupe est moins onéreux que le passage à tout autre produit. Tel est le cas, entre autres, des produits ayant en commun une partie de leur outillage. Au cours de leur «supercampagne», les campagnes des produits du supergroupe sont réalisées d'une traite, directement l'une à la suite de l'autre; les unes font partie de toutes les supercampagnes du supergroupe, d'autres, dites «à cycles libres», en sautent un nombre quelconque pour être rattachées chacune à la supercampagne respective la plus proche. Le mode de détermination des intervalles optimaux entre supercampagnes et les modalités optimales de participation des campagnes concernées sont étonnamment simples. Soient  $W_g$  le coût de la mise en place d'une supercampagne du supergroupe g,  $w_{gp}$  celui de la mise en place de la campagne du produit p faisant partie de g.

Pour commencer, les intervalles entre campagnes sont établis comme si la question des supercampagnes ne se posait pas. Un seul parmi tous les produits du supergroupe, le produit  $p = 1$ , celui aux intervalles entre campagnes les plus faibles, fait office de «produit cadenceur». Il assume, à lui tout seul, le coût  $W_g$  de la mise en place de la supercampagne de son supergroupe. Ses cycles sont aussitôt recalculés, son coût de mise en campagne venant de passer de  $w_{g1}$  à  $W_g + w_{g1}$ . Les campagnes des autres produits faisant partie de  $g$ , aux cycles libres, seront raccrochées chacune à la campagne la plus proche de leur produit cadenceur. Cependant, comme l'ajout de  $W_g$  à  $w_{g1}$  a fait augmenter les cycles du produit 1, c'est-à-dire les espacements entre futures supercampagnes de  $g$ , il se peut que quelques-uns des cycles libres soient devenus inférieurs aux cycles cadenceurs. Les produits concernés, les produits 2, 3, 4, par exemple, rejoignent le produit 1 pour fixer les fréquences des supercampagnes: le coût de mise en supercampagne passe à  $W_g + w_{g1} + w_{g2} + w_{g3} + w_{g4}$ , le coût d'attente de l'ensemble des campagnes cadenceuses du supergroupe  $g$  étant calculé en confondant les produits 1, 2, 3, 4, qui, à ce stade, seront considérés comme ne formant plus qu'un seul produit. Les intervalles entre supercampagnes s'allongent davantage et d'autres produits risquent de perdre leur indépendance en accédant à leur tour à l'état de produit cadenceur. La procédure est répétée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de cycles libres de durées inférieures à celle de leur supercampagne respective. Finalement, la configuration atteinte est soumise aux opérations de compactage de la charge et de mise en adéquation des campagnes et des domaines. (Comme l'existence de superproduits réduit le nombre de campagnes à cycles indépendants, c'est surtout dans ce contexte que l'interdépendance des cycles risque de poser problème).

Un autre cas est celui des campagnes qui, de durées limitées, peuvent être prolongées moyennant un supplément de dépenses. Mettons qu'une partie de l'outillage nécessaire à l'élaboration d'un produit donné, au coût de mise en place  $w$ , ait une tenue pratiquement illimitée alors que, pour une autre partie, au coût de montage  $x$ , la tenue ne dépasse pas un temps  $e$  de production effective à pleine capacité. Quel est, par campagne, le nombre optimal de

jeux d'outils soumis à usure qu'il y a lieu de prévoir? La solution est immédiate: le cycle optimal de chacune des campagnes est calculé pour un nombre croissant de remplacements. Le coût de mise en campagnes prend successivement les valeurs  $w + i * x$ ,  $i$  variant de 1 à un nombre entier quelconque. En l'occurrence, les minima des courbes de la figure 1 ne sont valables que dans la mesure où la quantité produite pendant la campagne se situe entre  $(i - 1) * e$  et  $i * e$  ou est égale à  $i * e$ . La solution correspond au minimum valable le moins élevé.

### Chaînes de production

Comme, normalement, dans l'industrie, les produits subissent successivement plusieurs opérations à des unités de production différentes, d'unité en unité les répercussions d'une mise en campagnes à l'une ou à l'autre parmi elles sont couvertes par des marges adéquates. Aux unités de production d'aval, les séquences de réalisation des lots doivent être «alignées» sur celles de l'unité procédant par campagnes afin de permettre l'expédition immédiate des marchandises que les clients sont prêts à recevoir dès mise à disposition. Les programmes de mise en fabrication de ces unités, au lieu d'être fondés sur l'échéancier, partiront d'une projection vers l'aval de la disposition des lots au sein des campagnes qui ont déjà été établies jusque-là. Il va de soi que les projections s'effectuent également vers l'amont. Si les productions de plus d'une des unités procèdent par campagnes, c'est l'unité au coût d'attente le plus élevé qui prévaudra. Aux unités d'amont ou d'aval, les mises en campagnes se feront à partir des charges alignées. Le cas échéant, le potentiel d'attente de la structure de production dans son ensemble s'en trouvera considérablement réduit.

Pour un lot  $j$  susceptible d'être expédié immédiatement après réalisation, un temps d'attente entre mise à disposition et expédition n'existe pas. Dans la formule de  $C_{jr}$ , la valeur de  $s_j$  s'annule. Cela n'est valable que pour l'unité ( $U_d$ ) qui, dans la chaîne de production, est la dernière avant expédition du lot concerné à procéder par mise en campagnes. Encore faut-il que d'éventuelles unités de production subséquentes – aux séquences de production libres de toute contrainte – soient convenablement alignées sur  $U_d$ .

Pour un lot donné, la part des frais de stockage qui représentent le manque à gagner pour mise en fabrication avant terme (c.-à-d. pour paiement retardé), est, par unité de temps d'attente supplémentaire, la même à toutes les unités de production exigeant une mise en campagnes et ce dans la mesure où cette part contribue à la réalisation prématurée du lot.

#### **Méthode alternative de mise en campagnes**

Nous venons d'exposer une méthode de mise en campagnes que nous qualifierons d'«a posteriori», c'est-à-dire postérieure à la mise en charge. Parfaitement cohérente en tout point, elle est robuste et facile à mettre en œuvre. Généralement, la méthode appliquée dans l'industrie, dite «directe» ou d'«a priori», part au contraire de la mise en campagnes avant de procéder à la charge des installations. Les commandes sont inscrites dans le cadre d'un programme de mise en fabrication comportant une suite de campagnes fixées a priori. Le schéma, plutôt que de partir d'un carnet tel qu'il se présente à un moment donné, repose sur une prévision du mix des produits que les clients sont censés commander par la suite. Si, normalement, pour une entreprise donnée, le mix est remarquablement stable à plus longue échéance, il n'en plus ainsi à court terme. La grille préétablie des campagnes ne résiste pas aux exigences immédiates d'une clientèle dont, nécessairement, les besoins s'écartent des prévisions. On sait d'expérience que le moindre écart par rapport à un préprogramme mène à des improvisations en chaîne et, très rapidement, au chaos. C'est là une des causes du manque de confiance de la part de la clientèle dans les promesses du fournisseur. Assez paradoxalement, les commerciaux, qui, bien entendu, ne peuvent garantir la composition du mix, comptent sur les services de production quant à la mise au point du futur programme. Cependant, de ce côté-là non plus, aucun artifice ne peut faire coïncider dates de fourniture et dates de mise en fabrication, les unes dépendant des besoins de la clientèle, les autres des contraintes de l'outil de production. Les adeptes du «juste à temps» font enlever leurs marchandises à des dates précises sans se préoccuper d'éventuels programmes de mise en fabrication fondés sur un mix hypothétique. Ayant appris à ne pas se fier aux

plans de production, par souci de disposer en temps utile de leurs commandes, ils ont tendance à les faire inscrire aux toutes premières campagnes annoncées, quittes à les laisser en stock chez le fournisseur jusqu'aux dates d'expédition visées. Par ces agissements, les stocks générés par la méthode directe, à mises en campagnes a priori, risquent d'être plus importants que ceux de la méthode indirecte, à mises en campagnes a posteriori. L'idée de procéder par préprogrammes a son origine dans le concept des «stocks zéro», qui, en l'occurrence, est un leurre ; ici les stocks sont un mal nécessaire, dont la pleine acceptation est un préalable à leur gestion efficace. Il est vrai que, en dernier ressort, les deux méthodes reposent, l'une comme l'autre, sur des prévisions. Cependant, pour la méthode directe, les prévisions sont nombreuses et détaillées, alors que la méthode a posteriori se contente d'un nombre restreint de variables prévisionnelles globales, plus stables au fil du temps. Par sa conception même, la méthode indirecte dispose de procédures d'adaptation permettant d'éviter d'éventuels retards de livraison, sans, pour autant, risquer de créer du désordre.

La méthode directe devient problématique surtout quand plus d'une parmi les unités de fabrication procède par campagnes. Il est alors vain de vouloir établir un programme valable avant que le détail des commandes ne soit connu.

En période de mévente, la méthode directe tend à faire remplir le carnet au plus vite en conférant aux commandes à inscrire des délais de fourniture les plus courts possibles. L'échéancier risque de se vider au point de devenir ingérable. La méthode a posteriori, du fait de ses marges de sécurité, se préoccupe en premier lieu des cycles des différents groupes de produits. Elle maintient de la sorte un volume de carnet suffisant, adapté aux circonstances, et un ensemble d'échéances qui permettent de procéder à des programmes de mise en fabrication rationnels. Ainsi, pendant une période de récession prolongée, avec un carnet réduit au minimum, il nous a été donné de gérer sans heurts et à la satisfaction de la clientèle une mise en campagnes quasi optimale d'une quarantaine de produits, chacun d'entre eux ayant son outillage spécifique.

Ing. dipl. Henri Muller

Am 3. und 4. November 2012 verwandelt sich das CarréRotondes in Luxemburg in ein riesiges Forschungslabor: auf den Researchers' Days 2012 warten fesselnde Experimente, faszinierende Technologien und viele unermüdliche Forscher auf Groß und Klein.



## RESEARCHERS' DAYS 2012\_



Entdecke die Forschung, begegne den Forschern: das Motto der Researchers' Days.

Dass Forscher keine zurückgezogenen, zerzausten Gestalten sind, die man nie zu Gesicht bekommt, zeigt sich während der Researchers' Days, die vom Fonds National de la Recherche (FNR) organisiert werden. In über 20 interaktiven Workshops mit pädagogischem Hintergrund zeigen Forscher aus den unterschiedlichsten Bereichen wie spannend Wissenschaften sein können: anfassen, nachfragen und selber forschen ist hier angesagt.

Forschung ist allgegenwärtig: an den beiden Researchers' Days sogar in luxemburgischen Cafés. Im Exit 07 laden die Forscher zu lockeren Gesprächsrunden über aktuelle wissenschaftliche Themen ein, vermitteln mit Begeisterung ihr Wissen und stehen danach bei einem Drink für weitere Fragen zur Verfügung.

Nach dem Erfolg der Researchers' Nights 2008 und 2010 wird die diesjährige Auflage auf 2 Tage ausgeweitet. Am Samstag, den 3. November (von 14:00 bis 22:00 Uhr) sowie am Sonntag, den 4. November (von 10h00 bis 18h00 Uhr) werden im CarréRotondes Vergnügen und Lernen unter einen Hut gebracht, die Leidenschaft der Jugend und des breiten Publikums für die Forschung entfacht und die Wahrnehmung wissenschaftlicher Berufe entstaubt – und vor allem: gemeinsam geforscht!

Weitere Informationen unter: [www.researchersnight.lu](http://www.researchersnight.lu)

Mehr als ein Drittel der in Europa verbrauchten Endenergie entfällt auf den Gebäudesektor. Da in diesem Bereich enormes Einsparpotential besteht, wurden durch die EU-Direktive<sup>1</sup> alle Länder dazu aufgefordert Energie in diesem Sektor einzusparen. Die Energieeinsparung bei Gebäuden stellt somit eine zentrale Säule des Klimaschutzes dar.

# WIE VIEL ENERGIE VERBRAUCHEN NEUE UNTERRICHTS- UND BÜROGEBÄUDE IN LUXEMBURG?\_

Prof. Dr.-Ing. S.Maas, Ass.-Prof. Dr.-Ing. F.Scholzen, Dr.-Ing. Andreas THEWES, Ass.-Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann

## 1 Einleitung

In Luxemburg hat sich in den vergangenen Jahren der nationale Energieverbrauch ebenfalls verstärkt zum Gebäudesektor hin verändert. Während 1990 noch 71 % des gesamten Energieverbrauches auf den Industriesektor zurückzuführen waren und nur 20 % auf die Gebäude, hat sich dies bis zum Jahr 2009 deutlich verändert. Demzufolge entfallen nur noch 30 % auf den Industriesektor, 25 % auf Verkehr (nach Abzug der Treibstoffexporte) und 45 % auf den Verbrauch des Tertiären Sektors<sup>3</sup>, welcher sowohl die privaten und die öffentlichen Haushalte, als auch Dienstleistungsgebäude beinhaltet.

Die Richtlinie 2010/31/EG<sup>2</sup> fordert von den Mitgliedstaaten die nationalen Normen weiterhin zu verschärfen und Pläne zu erstellen, um die Anzahl an Niedrigstenergiegebäuden weiter zu erhöhen. Um die Energieströme in Gebäuden besser zu verstehen, Sparmaßnahmen zu erarbeiten und mögliche Bewertungen über das Energieeinsparpotential für Gebäude durchführen zu können, sind jedoch aussagekräftige Verbrauchsdatenanalysen notwendig, die leider oftmals noch nicht in verlässlicher Qualität vorliegen.

In der Richtlinie wird zudem empfohlen für die Berechnung eine Unterteilung aller Gebäude in angemessene Kategorien vorzunehmen, welche von Einfamilienhäusern (EFH), über Bürogebäude und Unterrichtsgebäude bis hin zu Krankenhäusern, Hotels und Sportanlagen reicht.

In einer ersten Studie der Universität Luxemburg<sup>4</sup> wurden bereits neuere EFH in Luxemburg hinsichtlich ihres realen Energieverbrauches untersucht und ausgewertet.



Abb 1\_ Anzahl von erfassten Unterrichtsgebäuden in Luxemburg

Bei der hier vorliegenden Feldstudie konnten 47 Büro- und 63 Unterrichtsgebäude in Luxemburg energetisch erfasst werden, wobei Strom-, Wärme-, sowie teilweise auch der Kälteverbrauch getrennt vorlagen. Eine statistische Auswertung und Analyse der neueren Gebäude nach den unterschiedlichen Energieträgern (Wärme, Strom), sowie nach energie-relevanten Einflussgrößen, wie Technisierungsgrad, Fensterflächenanteil oder Bauweise zeigen die Probleme bei den neuen Bauweisen auf.

## 2 Auswertung der erfassten Gebäudedaten

### 2.1 Beschreibung der erfassten Stichprobe

Die im Folgenden untersuchte Stichprobe beinhaltet Unterrichts- und Bürogebäude, welche hauptsächlich nach 1996 errichtet wurden. Diese Grenze wurde gewählt, weil zu diesem Zeitpunkt eine U Wert-basierte Wärmeschutzverordnung in Luxemburg in Kraft getreten ist und bis zur Umsetzung der neuen Energieeffizienz-Richtlinie für Nichtwohngebäude<sup>5</sup> zum 01.01.2011 ihre Gültigkeit hatte. Die erfassten Gebäude besitzen eine beheizte Bruttofläche von ca. 650.000 m<sup>2</sup>. In Abhängigkeit der Nutzungsart wurden die Gebäude in Gruppen unterteilt. Bei den Unterrichtsgebäuden sind dies Précoce, Préscolaire und Maison Relais (Kindertagesstätte), Primärschulen, Sekundarschulen und Sporthallen (s. Abbildung 1).

Zur Prüfung des gesamten Neubaubestandes wurde die Gruppenanzahl auf Landes- und Gemeindeebene reduziert. In Luxemburg existieren 49 Sekundarschulen, allerdings gibt diese Zahl keine Auskunft über die Gesamtheit der bestehenden Gebäude. Werden Schulen, welche nach 1996 erbaut oder komplett saniert wurden, als neu bezeichnet, so traf dies in Luxemburg zum damaligen Zeitpunkt auf 16 Sekundarschulen zu. Von diesen lagen in der Stichprobe 12 Schulen vor, was 75% entspricht. Somit kann von einer aussagekräftigen Datenbank bezüglich der Sekundarschulen gesprochen werden.

Die Primärschulen, die Précoce und die Préscolaire wurden als eine weitere große Gruppe angesehen, da sie bezüglich des Nutzerverhaltens ähnlich sind. Die Gesamtanzahl an Gebäuden wurde in einer Studie für das Jahr 2008/2009<sup>6</sup> mit 452 beziffert. Davon waren seinerzeit 91 Gebäude als



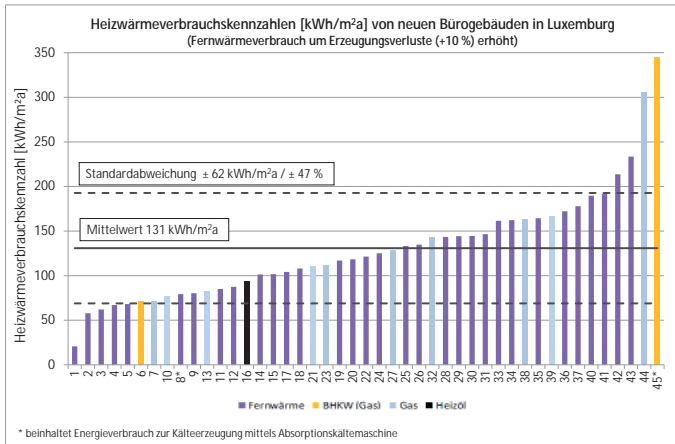


Abb 2\_ Heizwärmeverbrauchskennzahlen (inkl. Trinkwarmwasser) von neuen Unterrichtsgebäuden in Luxemburg

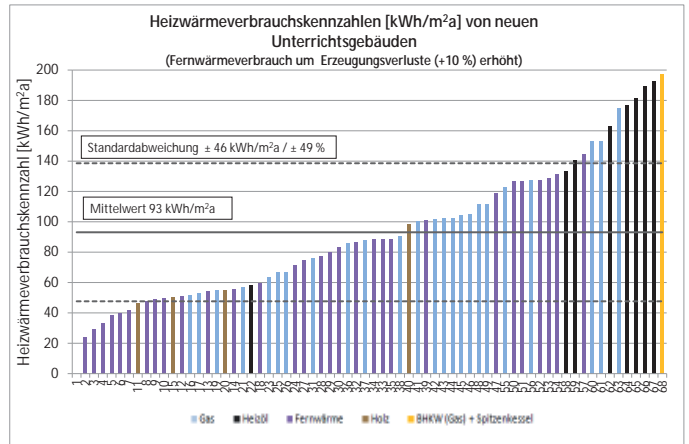


Abb 3\_ Heizwärmeverbrauchskennzahlen (inkl. Trinkwarmwasser) von neuen Bürogebäuden in Luxemburg

Neubauten bekannt, was durch Kontaktieren aller Gemeinden herausgearbeitet werden konnte. Zu 52 dieser 91, als bekannt geltenden, Neubauten liegen die realen Verbrauchswerte vor, was circa 55% der Grundgesamtheit entspricht. Die Stichprobe kann ebenfalls als aussagekräftig angesehen werden.

Hinsichtlich der Bürogebäude wurde die Prüfung des Stichprobenumfangs über die Bruttogrundfläche durchgeführt, da keine verlässlichen Angaben zu den Gebäudezahlen zu finden waren. Von 2000 bis 2010 wurden in Luxemburg ungefähr 1.342.000 m<sup>2</sup> neue Büroflächen geschaffen<sup>7</sup>. Die erfassten Gebäude besitzen eine beheizte Nettofläche von circa 230.000 m<sup>2</sup> was 17 % der zuvor genannten Grundgesamtheit entspricht.

### 2.2 Festlegung der Bezugsgrößen

Um Verbrauchswerte mehrerer Objekte vergleichbar zu machen, müssen gemeinsame Bezugssysteme definiert werden. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde die beheizte Bruttofläche als einheitlicher Flächenbezug gewählt. Die konditionierte Bruttofläche ist als die allseitig umschlossene und überdeckte Grundfläche, einschließlich der Konstruktionsflächen definiert<sup>5</sup>.

Ein weiteres zu definierendes Bezugssystem sind die klimatischen Randbedingungen. Für den Wärmeverbrauch wurde eine Klimabereinigung auf das mittlere luxemburgische Klima durchgeführt. Hierzu wurde der witterungsabhängige Wärmeverbrauch über die Heizgradtage  $HGT_{20/15}^A$  bereinigt:

$$E_{Vhb} = E_{hb} \times \frac{HGT_{(20/15m)}}{HGT_{(20/15)}}$$

wobei:

- $E_{Vhb}$  witterungsbereinigter Endenergieverbrauch Heizwärme eines Gebäudes
- $E_{hb}$  unbereinigter Endenergieverbrauch Heizwärme eines Gebäudes
- $HGT_{20/15m}$  Heizgradtage des langjährigen luxemburgischen Mittels<sup>22</sup>
- $HGT_{20/15}$  Heizgradtage des relevanten Jahres

Der erfasste Kälteverbrauch der Bürogebäude wurde ebenfalls bereinigt, obwohl das luxemburgische Règlement<sup>5</sup>

darauf hinweist, dass der Energieverbrauch zur Kälteerzeugung dem witterungsunabhängigen Anteil zuzuordnen ist. Im Rahmen dieser Feldstudie wurden die Verbrauchswerte in Abhängigkeit der Kühlgradtage<sup>B</sup>, bezogen auf eine Grenztemperatur von 16 °C, bereinigt.

$$E_{Vsb} = E_{Vsm} \times \frac{KGT_{(16/16m)}}{KGT_{(16/16)}}$$

wobei:

- $E_{Vsb}$  witterungsbereinigter Endenergieverbrauch zum Kühlen eines Gebäudes
- $E_{Vsm}$  gemessener, unbereinigter Endenergieverbrauch zum Kühlen eines Gebäudes
- $KGT_{16/16m}$  Kühlgradtage des langjährigen luxemburgischen Mittels [22]
- $KGT_{16/16}$  Kühlgradtage des relevanten Jahres

### 2.3 Wärmeverbrauch

Als erste Größe wurde der gemessene Wärmeverbrauch ausgewertet, welche auch den Energieverbrauch für Trinkwarmwasser enthält. Der Heizwärmeverbrauch verliert in Bezug auf den Gesamtenergieverbrauch jedoch zusehends an Bedeutung. Abbildung 2 + 3 zeigt von den Unterrichts- und Büroobjekten die Wärmeverbrauchskennzahlen bezogen auf die Bruttofläche. Die farbliche Unterscheidung kennzeichnet zusätzlich den Energieträger, welcher in dem Gebäude zum Heizen verwendet wird. Der Mittelwert der Unterrichtsgebäude errechnete sich zu 93 kWh/(m<sup>2</sup>a) und liegt somit deutlich unterhalb der Bürogebäuden mit 131 kWh/(m<sup>2</sup>a) und der neueren Einfamilienhäusern mit ebenfalls 131 kWh/(m<sup>2</sup>a) [4]. Bei der Auswertung wurde beachtet, dass einige der Gebäude mit Fernwärme versorgt werden und somit in den Wärmebilanzen dieser Gebäude keine Erzeugungs- und Bereitstellungsverluste berücksichtigt sind. Zum besseren Vergleich mit Gebäuden, welche eine Gas- oder Ölheizung nutzen, wurden die Fernwärmeverbrauchskennzahlen um 10% erhöht. Dieser Wert entspricht einer Anlagenbewertung nach DIN 4701-10 [8] sowie der gemessenen Größenordnung bei einer internen Studie zu bestehenden Niedertemperaturkesseln durch die Universität Luxemburg.

A\_  $HGT_{20/15m}$  des langjährigen luxemburgischen Mittels (1995 – 2009) = 3560 Kd/a

B\_  $KGT_{16/16m}$  des langjährigen luxemburgischen Mittels (1997 – 2009) = 325 Kd/a

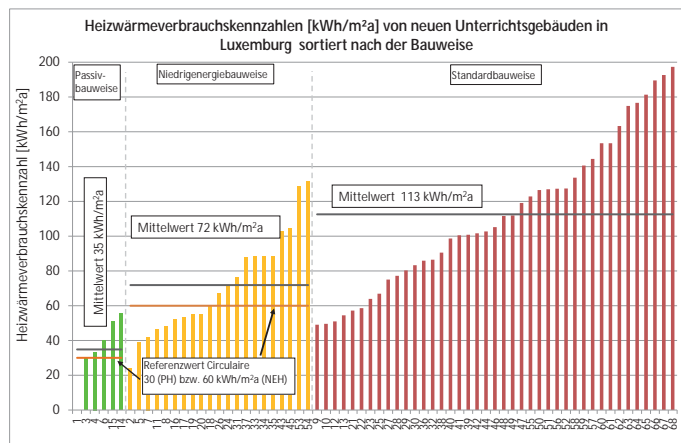


Abb 4\_ Heizwärmeverbrauchskenzahlen von neuen Unterrichtsgebäuden in Luxemburg sortiert nach der Bauweise

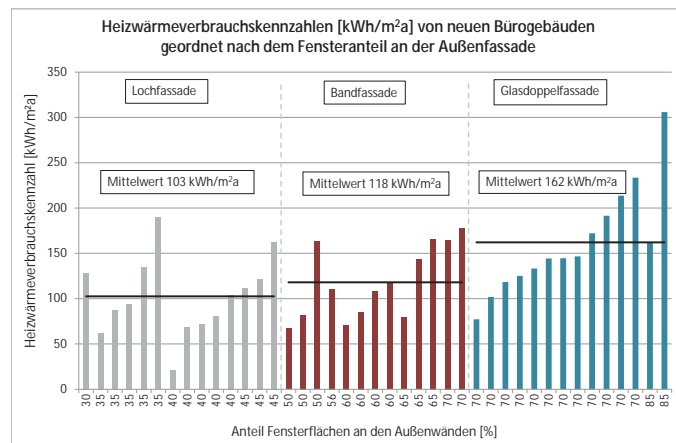


Abb 5\_ Heizwärmeverbrauchskenzahlen von neuen Bürogebäuden in Luxemburg geordnet nach dem Fensteranteil an der Außenfassade

Die errechnete Standardabweichung ist mit  $\pm 49\%$  sehr groß und lässt sich mit den verschiedenen zusammengefassten Gebäudearten und auch Nutzungsbereichen erklären. In der Liste der Unterrichtsgebäude sind beispielsweise kleine Kindergärten, als auch große Lycées mit eigener Kantine, Sporthalle und Ateliers vorhanden.

Die Spannweite der Kennwerte in Abbildung 2 ist folglich ebenfalls sehr groß von 24 bis 197 kWh/(m<sup>2</sup>a). Der geringste Verbrauch liegt in einem Niedrigenergiegebäude vor, welches sich durch seine sehr hohe Luftdichtigkeit und niedrige U-Werte auszeichnet. In diesem Gebäude sind ansonsten keine den Wärmeverbrauch beeinflussende Sonderbereiche, wie eine Sporthalle oder eine Großküche angeschlossen.

Ein untersuchtes Gebäudemerkmal, welches scheinbar ein Indiz für den Heizwärmeverbrauch darstellt, ist das Baualter. Fast alle Schulen, die nach 2005 errichtet wurden, verbrauchen unter 100 kWh/m<sup>2</sup>a und meist unter 50 kWh/(m<sup>2</sup>a) Wärme. Der Hintergrund für den sinkenden Heizwärmeverbrauch nach 2005, war das in Kraft treten einer neuen Förderrichtlinie „Fonds pour la protection de l'Environnement“<sup>9</sup>. Durch den Fonds konnten Gemeinden Fördergelder beantragen, wenn öffentliche Gebäude in Passiv- oder Niedrigenergiebauweise errichtet wurden. Die vorliegende Stichprobe enthält 40% Niedrigenergie- (21 Gebäude) bzw. Passivschulen (6 Gebäude). Die Auswertung der Energiekennwerte nach den unterschiedlichen Bauweisen verdeutlicht, dass der Effekt bezüglich der verbrauchten Heizwärme sehr positiv ausfällt. Der Mittelwert Wärme sinkt von Schulen in Standardbauweise zur Niedrigenergiebauweise um 36% und zur Passivschule um weitere 52% (s. Abbildung 4). Werden die gemessenen Verbrauchswerte jedoch mit denen in der Planungsphase errechneten Daten verglichen, ist feststellbar, dass nur bei knapp 50 % der Gebäude die Grenzwerte gemäß der Richtlinie eingehalten werden (s. Abbildung 4), was jedoch Voraussetzung für eine entsprechende Klassifizierung war. Dies zeigt, dass die errechneten Werte in der Realität aufgrund von Planungs- oder Ausführungsabweichungen, fehlerhaften Berechnungen oder den Einfluss des Nutzers nur schwer einzuhalten sind.

Bei den Bürogebäuden liegt der durchschnittliche Wärmeverbrauch (131 kWh/m<sup>2</sup>a) aufgrund der längeren Nutzungszeiten und den speziellen Bauweisen (hoher Glasanteil) oberhalb des Verbrauches der Schulen und ist trotz der hohen zur Verfügung stehenden internen Lasten im Bereich der Einfamilienhäuser einzuordnen. Der Glasanteil an der Fassade wird oftmals kontrovers diskutiert. Die steigenden solaren Erträge sollen dazu beitragen den Wärmeverbrauch zu senken und den Tageslichteinfall zu verbessern. Die Transmissionsverluste sollen folglich aufgrund der niedrigen U-Werte bei 3-fach Verglasungen so gering sein, dass sie durch die solaren Erträge mehr als kompensiert werden. Bei den ausgewerteten Gebäuden in Luxemburg wurde jedoch das Gegenteil festgestellt. Somit ist kein positiver Effekt der im Trend liegenden Glasdoppelfassaden erkennbar, sondern mit steigendem Glasanteil steigt auch der Wärmeverbrauch an (s. Abbildung 5). Dies wurde bereits von Gertis [10] vermutet und durch die vorliegende Stichprobe bestätigt. Dies ist damit in Verbindung zu verbringen, dass diese Objekte mit einem Glas ausgestattet sind, welches sich durch einen niedrigen Energiedurchlassgrad (g-Wert) auszeichnet, um der sommerlichen Überhitzungsgefahr halbwegs vorzubeugen. Dadurch reduzieren sich jedoch zusätzlich die solaren Erträge im Winter und der mögliche Vorteil hinsichtlich des Heizwärmeverbrauchs ist statistisch nicht mehr erkennbar. Ebenfalls sind nicht immer 3-fach Verglasungen mit sehr niedrigem U-Wert verbaut.

## 2.4 Stromverbrauch

Zu 64 Unterrichtsgebäuden konnte der Stromverbrauch separat erfasst werden. Der arithmetische Mittelwert liegt mit 32 kWh/(m<sup>2</sup>a) deutlich unter dem des thermischen Verbrauches der gleichen Gebäudegruppe. Die sich ergebende Standardabweichung ist mit  $\pm 47\%$  allerdings sehr groß, was mit den unterschiedlichen Ausstattungen der Gebäude zusammenhängt. Das Gebäude mit dem niedrigsten Verbrauch (6 kWh/(m<sup>2</sup>a)) ist eine reine Primärschule ohne Sondernutzungsbereiche. Die installierte Lüftungsanlage läuft in der Passivschule nur kurzzeitig außerhalb der Unterrichtszeit, um die Luftqualität zu verbessern. Zudem ist eine sehr effiziente Beleuchtung mit Präsenzmeldern und Tageslichtsensoren installiert. Die beiden Gebäude mit

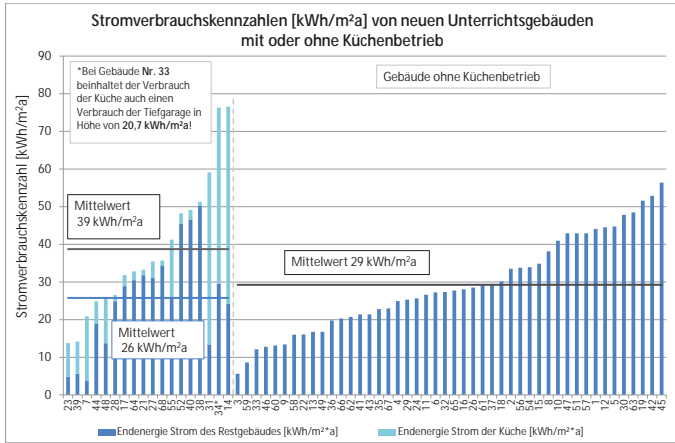


Abb 6\_ Stromverbrauchskennzahlen von neuen Unterrichtsgebäuden in Luxemburg mit und ohne Küchenbetrieb

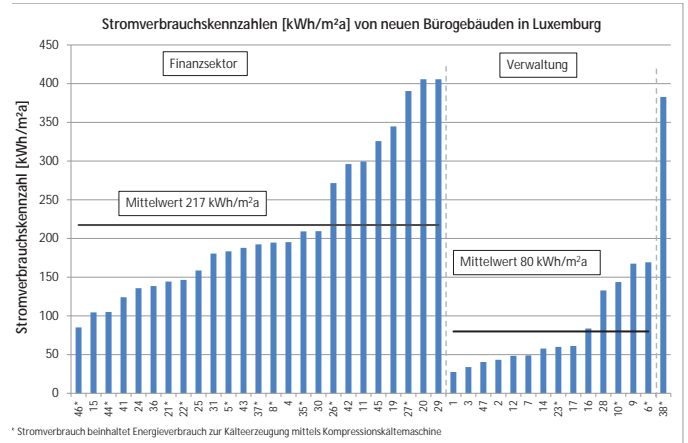


Abb 7\_ Stromverbrauchskennzahlen von neuen Bürogebäuden in Luxemburg

Verbrauchswerten über 70 kWh/(m²a) sind Primärschulen mit integrierter Maison Relais. Die hohen Verbrauchswerte ergeben sich hauptsächlich durch den täglichen, mehrstündigen Einsatz von stromverbrauchenden Küchengeräten deren genauer Verbrauch durch fehlende Zähler jedoch nicht messtechnisch erfasst werden konnte. Gleiches gilt für Schulen mit zugehöriger und nicht getrennt erfasster Sporthalle. Bei einer Britischen Studie zu Schulgebäuden wurde herausgefunden, dass der Energieverbrauch in Schulen mit Cateringbetrieb um 7 – 10 % höher liegt. Um bis zu 20 % kann sich der Energieverbrauch sogar erhöhen, wenn Sporthallen in das Gebäude integriert sind<sup>11</sup>. Besonders der Stromverbrauch variiert stärker in Abhängigkeit davon, ob eine Großküche in das Gebäude integriert ist. Eine rechnerische Abschätzung sowohl auf der Basis der installierten Leistungen als auch der Anzahl zubereiteter Gerichte ergab im Mittel über alle untersuchten Gebäude einen durch die Küche bedingten Mehrstromverbrauch von circa 10 kWh/m²a. (s. Abbildung 6).

Bei den Bürogebäuden gestaltete sich der Stromverbrauch sehr auffällig. Die größten Energieverbraucher werden alle mit Strom betrieben. Dies sind zum Beispiel Lüftungsanlagen, Rechenzentren, Büroausstattung, Beleuchtung und falls vorhanden häufig auch die Kältemaschinen. Für 40 Gebäude der Stichprobe konnten die Stromverbrauchskennzahlen separat erfasst werden. Im Gegensatz zu den errechneten Mittelwerten der Einfamilienhäuser oder Unterrichtsgebäude liegt der arithmetische Mittelwert des Stromverbrauches von Bürogebäuden mit 173 kWh/m²a höher als der mittlere thermische Verbrauch der gleichen Gebäudegruppe. Somit ist erstmals bei einer Gebäudegruppe der Stromverbrauch deutlich maßgebend, wenn über notwendige Einspar- und Sanierungsmaßnahmen diskutiert wird. Die große gemessene Standardabweichung von ± 64% hängt mit den unterschiedlichen Technisierungsgraden oder auch mit der Installation von großen Rechenzentren in Gebäuden des Finanzsektors zusammen (s. Abbildung 8). Auf Grund dessen liegen die geringsten Verbrauchskennwerte in Gebäuden vor, welche lediglich durch einfache Büroarbeitsplätze belegt sind, in denen der Großteil des Stromverbrauches hauptsächlich durch PCs, Drucker und Beleuchtung zustande kommt. Besonders im Bereich des Finanzsektors sind aller-

dings durch hohe elektrische Grundlasten große interne Lasten vorhanden. Ebenso besitzen diese Gebäude meist große Glasfassaden, welche zu hohen solaren Erträgen im Sommer führen. Eine aktive Kühlung wird dadurch unumgänglich was einen zusätzlichen Stromverbrauch verursacht und in Summe zu überdurchschnittlichen Verbrauchskennwerten führt (s. Abbildung 7 + 8).

**2.5 Primärenergieverbrauch**

Der Primärenergieverbrauch wird in Abhängigkeit von Faktoren bestimmt, welche in jedem Land leicht unterschiedlich sind. Die Primärenergiefaktoren für Luxemburg sind in dem Règlement Grand-Ducal<sup>5</sup> festgeschrieben. In Abhängigkeit vom Energieträger für den Wärmeverbrauch (z.B. Holz) ergeben sich demnach zum Teil stark abweichende Faktoren, welche somit manche Gebäude primärenergetisch verbessern können. Für die folgenden Auswertungen wurden daher Einheitsfaktoren verwendet ( $e_{p,Wärme}=1,1$ ;  $e_{p,Strom}=2,66$ ), um die Qualität der Gebäude unabhängig von den eingesetzten Energieträgern zu vergleichen. Die analysierten Unterrichtsgebäude zeigen eine extrem breite Spannweite von ausgezeichnet zu bewertenden 47kWh/(m²a) bis hin zu hohen 320 kWh/(m²a) (s. Abbildung 9). Hierbei wird deutlich, welche Auswirkung der hohe Stromverbrauch auf den Gesamtprimärenergieverbrauch hat. Besonders bei Gebäuden mit erhöhtem Stromverbrauch, wie bei den Nummern 14 und 34 (Passiv- beziehungsweise Niedrigenergiebauweise, mit Maison Relais, Primärenergieverbrauch >250 kWh/m²a), macht sich dies bemerkbar. Generell ist heutzutage bei neuen Unterrichtsgebäuden ein Gesamtprimärenergieverbrauch von unter 100 kWh/m²a durchaus realistisch und erstrebenswert, was auch die Grenze für Green Buildings darstellt<sup>12</sup>. Insofern lässt sich enttäuscht feststellen, dass viele, der in den letzten Jahren in Luxemburg errichteten Schulen, einen Primärwärmeverbrauch von über 100 kWh/(m²a) erreichen. Lediglich zwei der untersuchten Gebäude unterschreiten diesen Grenzwert. Allerdings unterschreiten 33% aller untersuchten neuen Unterrichtsgebäude einen Primärenergieverbrauch von 150 kWh/(m²a), was positiv zu bewerten ist.

Bei den Bürogebäuden wurden ernüchternd hohe Primärenergieverbrauchskennzahlen gemessen (s. Abbildung 10).

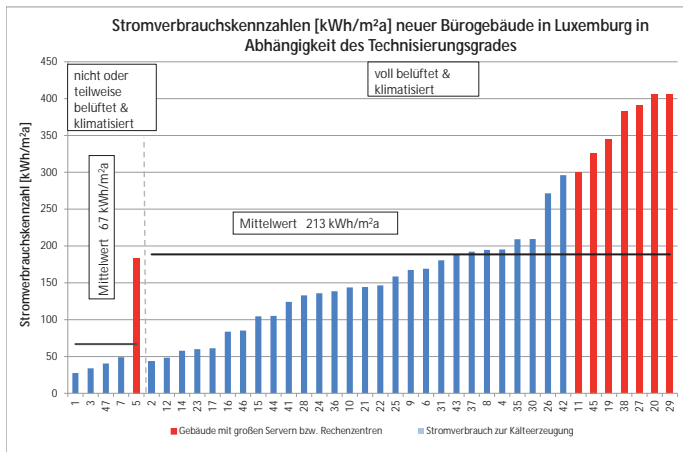


Abb 8\_ Stromverbrauchskennzahlen von neuen Bürogebäuden in Luxemburg in Abhängigkeit des Technisierungsgrades

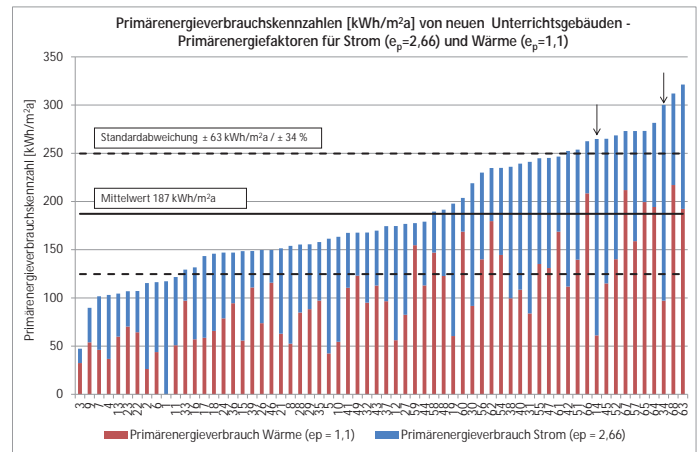


Abb 9\_ Primärenergieverbrauchskennzahlen von neuen Unterrichtsgebäuden - Primärenergiefaktoren für Strom ( $e_p=2,66$ ) und Wärme ( $e_p=1,1$ )

Hierbei sind die Auswirkungen des hohen Stromverbrauchs auf den Gesamtprimärenergieverbrauch deutlich erkennbar. Häufig übersteigt auch der Kühlenergieverbrauch den Heizwärmeverbrauch auf primärenergetischer Ebene, was die Aussage bekräftigt, dass bei neuen Bürogebäuden das Heizen energetisch eher eine untergeordnete Rolle spielt. Das Hauptaugenmerk muss letztendlich auf das Verringern von internen und solaren Lasten und das Vermeiden einer Vollklimatisierung gelegt werden, wie aus Abbildung 8 ganz deutlich hervor geht.

### Zusammenfassung

Im Gebäudesektor sind die Schul- und Bürogebäude neben den Wohngebäuden einer der Hauptenergieverbraucher in Luxemburg. Hierbei stellt jedoch nicht mehr, wie häufig bei Altbauten, der Wärmeverbrauch das Hauptproblem dar, da durch dichtere Bauweisen und besser isolierte Fassaden der Wärmebedarf heutzutage damit gesenkt werden kann. Gleichfalls besteht nach wie vor Wärmeeinsparpotential durch das Gebäudedesign, wie die extreme Spannweite der erfassten Kennzahlen zeigt. Dagegen ist der Stromverbrauch durch die Technisierung von neuen Niedrigenergie- und Passivgebäuden oder die umfangreiche technische Ausstattung der Bürogebäude angestiegen und kompensiert dadurch das mögliche Einsparpotential durch effiziente Beleuchtung oder eine effizientere Bauweise.

Die Passiv und Niedrigenergiegebäude sparen teilweise deutlich an Wärme (bis zu 70%) gegenüber der Standardbauweise ein. Durch den erhöhten Stromverbrauch bei diesen Bauweisen wird dies wieder großteils kompensiert und die gemessene mittlere Primärenergieeinsparung beträgt lediglich 17 – 37%. Allgemein wurde sogar festgestellt, dass die neueren luxemburgischen Schulen aufgrund des steigenden Stromverbrauchs mehr Primärenergie verbrauchen als ältere ausländische Objekte (s. Abbildung 11).

Bei den Bürogebäuden verbraucht besonders der Finanzsektor, welcher 50% der gesamten luxemburgischen Bürofläche belegt, weit mehr Energie, als einfache Verwaltungsgebäude. Hierbei stellt nicht der Wärmeverbrauch das Hauptproblem dar, sondern der Stromverbrauch ist in den letzten Jahren trotz energiesparender Beleuchtung und Bürogeräte aufgrund gestiegener Komfortansprüche (Lüf-

tung und Kühlung) und einem erhöhten Technisierungsgrad an Informationstechnologie (PCs, Beamer, Rechenzentren) deutlich gewachsen. Der Finanzsektor mit einem durchschnittlichen Stromverbrauch von über 210 kWh/m²a übertraf hierbei noch die erwarteten Zahlen. Primärenergieverbrauchswerte von über 1.300 kWh/m²a und ein Mittelwert aller Gebäude aus diesem Sektor von 800 kWh/m²a sind indiskutabel und zeigen, dass das Gebäudedesign, die Haustechnik und Green IT zusammengeführt werden müssen. Die Herausforderung für den Gebäudeplaner besteht darin energieverbrauchende aktive Kühlung zu vermeiden und trotzdem einen hohen Grad an thermischem Komfort zu gewährleisten. Beste Gesamtprimärenergieverbrauchswerte von unter 100 kWh/m²a beweisen, dass es möglich ist, energiesparende Bürogebäude zu errichten. Hierzu dürfen jedoch während der Planungsphase keine Fehler beim integralen Gebäudedesign begangen werden und der Facility Manager und die Nutzer müssen bezüglich Energiesparmaßnahmen im Vorfeld ausreichend informiert sein.

Die abschließende Tabelle zeigt zusammenfassend einen Überblick über die wichtigsten Verbrauchsdaten von neueren Gebäuden in Luxemburg aus den bereits untersuchten drei Gruppen<sup>C</sup>.

### Anmerkung

Die Ergebnisse dieser Veröffentlichung sind Teile der Dissertation von Dr.-Ing. Andreas Thewes und sind während seiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Luxemburg entstanden. Die gesamte Dissertation ist bei dem Shaker Verlag erhältlich unter ISBN 978-3-8440-0417-5.

Dr.-Ing. Andreas Thewes  
www.paulwurth.com

Prof. Dr.-Ing. Stefan Maas  
Ass.-Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen  
Ass.-Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann  
www.uni.lu

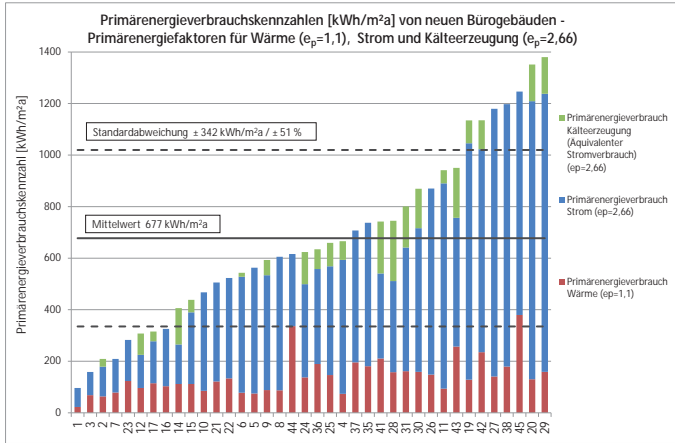


Abb 10\_ Primärenergieverbrauchskennzahlen von neuen Bürogebäuden - Primärenergiefaktoren für Wärme (ep=1,1), Strom und Kälteerzeugung (ep=2,66)

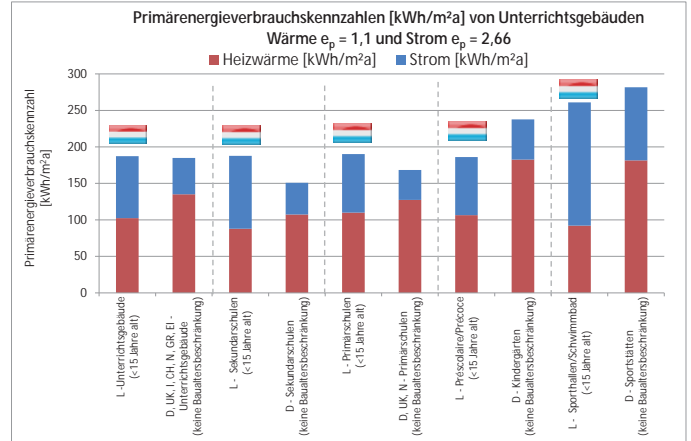


Abb 11\_ Primärenergieverbrauchskennzahlen von Unterrichtsgebäuden - Wärme ep=1,1 und Strom ep=2,66 [13] – [21]

Gebäudegruppe		Anzahl der Gebäude	Mittelwert Wärme [kWh/m2a]	Mittelwert Strom <sup>D</sup> [kWh/m2a]	Primärenergie <sup>E</sup> [kWh/m2a] Wärme (ep=1,1) Strom (ep=2,66)	Einsparpotential gegenüber Standard
Einfamilienhäuser	Standard	54	130 ± 32	25	210	
	Niedrigenergie	13	75	20	135	<b>35%</b>
	Passiv	5	0	35	93	<b>55%</b>
Unterrichtsgebäude	Standard	41	115 ± 43	30 ± 13	205	
	Niedrigenergie	21	70 ± 29	35 ± 16	170	<b>17%</b>
	Passiv	6	35 ± 20	35 ± 24	135	<b>35%</b>
Bürogebäude	Verwaltung	19	100 ± 42	95 ± 62	365	
	Besten 10 % - V	2	39	31	125	<b>75%</b>
	Finanzsektor	25	150 ± 67	240 ± 104	800	
	Besten 10 % - F	3	71	104	355	<b>55%</b>

Tabelle 1\_ Luxemburgische Benchmarks von Gebäuden unterschiedlicher Kategorien, welche nach 1996 errichtet wurden

C\_ Gerundete Werte  
 D\_ Stromverbrauch zum Kühlen enthalten  
 E\_ Gerundete mittlere Verbrauchskennzahlen

Literaturverzeichnis

- Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16. December 2002 on the energy performance of buildings.
- Directive 2010/31/EC of the European Parliament and of the Council of 19. May 2010 on the energy performance of buildings.
- Zweiter Nationaler Energieeffizienzplan Luxemburg im Rahmen der EU-Richtlinie über „Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen“ (2006/32/EG), Le Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg, Direction de l'Énergie, Luxembourg, September 2011.
- Maas, S., Waldmann, D., Zürbes, A., Scheuren, J.-J., Heinrich, H., Der Energieverbrauch von Einfamilienhäusern in Luxemburg, Gesundheitsingenieur, Volume 129 (2008), Issue 4, pp. 178-183.
- Règlement Grand-Ducal du 01.10.2010 concernant la performance énergétique des bâtiments fonctionnels, Luxembourg, 2010.
- Ministère de l'Éducation nationale et de la Formation professionnelle, Service des Statistiques et analyses, Les chiffres clés de l'éducation nationale, Statistiques et indicateurs 2008-2009, www.men.public.lu, Luxembourg, May 2010
- Property Partners Research, Quartalsbericht 1 – 2010.
- DIN 4701-10:2003-08: Energy efficiency of heating and ventilation systems in buildings – part 10 : Heating, domestic hot water supply, ventilation, Berlin, 2003
- Circulaire (No. 2489) aux administrations communales, aux syndicats de communes et aux établissements publics placés sous la surveillance des communes – Fonds pour la Protection de l'Environnement, 2005
- Gertis, K.: Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 2: Glas-Doppelfassaden, Bauphysik 21 (1999), Heft 2, Seite 54-66.
- Building Research Energy Conservation Support Unit, Saving energy in schools, Energy consumption Guide 73, Watford, UK, 1998.
- Bauer, M., Möslé, P., Schwarz, M., Green Building - Guidebook for Sustainable Architecture, Springer Verlag, Heidelberg, 2010.
- Verbrauchskennwerte 2005, Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland, Forschungsbericht der ages GmbH, 1. Edition, Münster, 2007.
- Kluttig, H., Dirscherl, A., Erhorn, H., Energieverbräuche von Bildungsgebäuden in Deutschland, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart, 2001.
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden, BBSR-Online-Publikation, Nr. 09/2009.
- Jones, P. G., Turner, R. N., Browne, D. W. J., Illingworth, P. J., Energy benchmarks for public sector in Northern Ireland, Proceedings CIBSE conference, Dublin, 2000.
- Corngati, S. P., Corrado, V., Filippi, M., A method for heating consumption assessment in existing buildings: a field survey concerning 120 Italian schools, Energy and buildings 40 (2008), pp. 801-809.
- Bundesamt für Energie, Schweizerische Eidgenossenschaft, Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienz-Massnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten, Bern, November 2006. (in German)
- Bergh, P.M., Abrahamson, A.S., Energy consumption in the service sector.2000, Statistics Norway – Department of Industry Statistics, Oslo, 2003.
- Hernandez, P., Burke, K., Owen Lewis, J., Development of energy performance benchmarks and building energy ratings for non-domestic buildings: An example for Irish primary schools, Energy and buildings 40 (2008), pp. 249-254.
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Patargias, P., Gaitani, N., Sfakianaki, K., Papaglastra, M., Pavlou, C., Doukas, P., Primikiri, E., Geros, V., Assimakopoulos, M.N., Mitoula, R., Zerefos, S., Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings, Energy and buildings 39 (2007), pp. 45 – 51.
- Tagesmitteltemperaturen und Heizgradtage von Luxemburg, veröffentlicht durch Chambre des Métiers, http://www.chambre-des-metiers.lu

Le professeur Dr Lionel Briand, chercheur à l'Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and Trust (SnT) de l'Université du Luxembourg, s'est vu décerner le Harlan D. Mills Award de l'IEEE Computer Society – l'une des distinctions les plus prestigieuses dans le domaine du développement logiciel. Le prix est attribué à des chercheurs et des praticiens expérimentés qui ont publié d'excellentes contributions à la théorie et à la pratique de l'informatique. Lors de la délibération, le jury met l'accent sur la transposition dans la pratique d'approches théoriques dans le domaine du développement logiciel. Briand reçoit cette distinction en reconnaissance de ses contributions fondamentales et pratiques en matière de test et de validation basés sur les modèles.

Lionel Briand

## CHERCHEUR DU SNT REÇOIT HARLAN D. MILLS AWARD 2012

La plus haute distinction dans le domaine du développement logiciel



Notre monde moderne et l'ensemble des secteurs industriels – de la construction automobile à la médecine – reposent de plus en plus sur des systèmes logiciels complexes. Sont ainsi concernés les procédés de fabrication, les véhicules et les appareils commandés par logiciel, de même que les centres de logistique, les réseaux téléphoniques et les nœuds Internet, mais aussi les grandes places financières comme Luxembourg, Londres et New York. Ces systèmes doivent donc être conçus de manière à assurer le plus haut degré possible de fiabilité, de robustesse et de sécurité. «Entre-temps, les systèmes fondés sur plusieurs logiciels sont devenus tellement complexes que les développeurs de logiciels ont souvent du mal à garantir leur fiabilité à cent pour cent », Lionel Briand a-t-il déclaré. « Pour pouvoir mettre au point des systèmes à forte intensité de logiciels, qui sont dans le même temps peu coûteux, nous avons besoin de technologies automatisées pour le test et la validation de logiciels. »

Briand, qui s'emploie depuis de nombreuses années à relever ce type de défis, a trouvé récemment le point d'attache idéal pour sa recherche. En janvier 2012, il a été nommé directeur scientifique du nouveau Software Verification and Validation Laboratory du SnT. Le nouveau laboratoire est financé par le Programme Excellence Award for Research in Luxembourg (PEARL) du Fonds National de la Recherche (FNR) luxembourgeois. Jusque fin 2011, Briand était directeur du centre norvégien Certus pour la vérification et la validation de logiciels du Simula Research Laboratory à Oslo. Il y a mené des recherches en étroite collaboration avec des partenaires de l'industrie.

Avant, Briand était professeur et chaire de recherche du Canada (niveau 1) dans le domaine du développement

logiciel du département Systems und Computer Engineering de l'université Carleton à Ottawa, au Canada. Briand a également été le premier directeur pour le développement de la qualité des logiciels au Fraunhofer Institut für Experimentelle Softwareentwicklung et chercheur au Software Engineering Laboratory, l'un des groupes de travail qui se compose du Goddard Space Flight Center (CSC) de la NASA et de l'université du Maryland aux États-Unis. Ses recherches sont axées sur le développement, le test et la vérification fondés sur les modèles, de même que sur le développement logiciel empirique et basé sur la recherche. La revue spécialisée Journal of Systems and Software, publiée par la maison d'édition Elsevier, a déjà à plusieurs reprises classé Briand parmi les cinq meilleurs chercheurs au monde dans le domaine du développement logiciel.

Le Harlan D. Mills Award : Le Harlan D. Mills Award appartient au programme IEEE Awards. L'IEEE est la plus grande association professionnelle au monde dédiée au développement de l'innovation et de la qualité technologiques au profit de l'humanité. IEEE est l'abréviation de « Institute of Electrical and Electronics Engineers ».

Le scientifique Harlan D. Mills a obtenu une reconnaissance internationale pour ses contributions dans le domaine du développement de systèmes et de logiciels, où il a mis l'accent sur l'importance des méthodes mathématiques. Le Dr Mills était professeur dans des universités américaines telles que l'université Iowa State, l'université de New York, l'université Johns Hopkins, l'université du Maryland et l'université de Floride, de même qu'au Florida Institute of Technology. Par ailleurs, Mills a bénéficié d'une bourse de recherche d'IBM. Depuis 1999, le Harlan D. Mills Award est décerné tous les ans à des chercheurs et des praticiens qui ont publié de manière continue des contributions importantes mettant l'accent sur le développement logiciel dans le secteur de l'informatique. Le prix, qui bénéficie également du soutien du Computer Society Technical Council on Software Engineering de l'IEEE, comprend une récompense de 3 000 dollars, un souvenir digne d'une pièce de musée et une invitation pour faire une intervention à la conférence organisée dans le cadre de l'ICSE.

www.uni.lu

# PLACE POUR VOTRE PUB



## Prima Aussichten!

**Du interessierst Dich für Technik?  
Du willst wissen, wie die Dinge  
wirklich laufen? Dann solltest Du  
Ingenieurwissenschaften studieren.**

**Ob Hochhaus oder Handy, ob Windkraft  
oder Windkanal:  
Hinter jeder Innovation stehen  
Ingenieure - und wir bilden sie aus.**

### **Wir bieten:**

- zwei Bachelor-Studiengänge
- anschließende Master-Studiengänge
- ein flexibles Studienprogramm
- eine internationale Ausbildung
- individuelle Betreuung
- Industriekontakte
- ein Umfeld mit exzellenten Jobaussichten

Interessiert? Mehr Infos per Mail an  
[ingenieur@uni.lu](mailto:ingenieur@uni.lu)

**Universität Luxemburg - my University!**

[www.uni.lu](http://www.uni.lu)

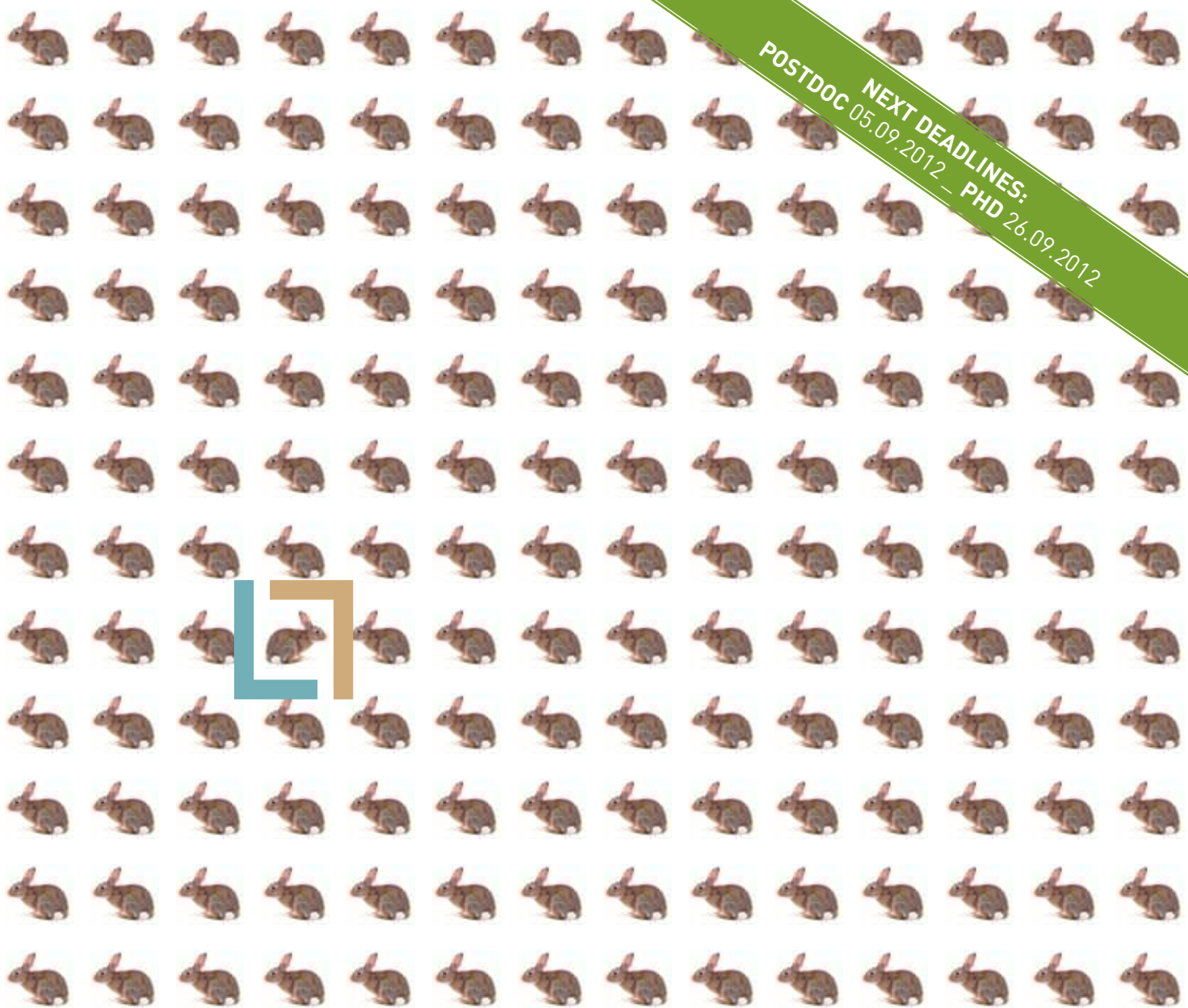
Tel. +352 46 66 44 - 6617/6222

**REVUE TECHNIQUE  
LUXEMBOURGEOISE**

T 26 73 99

[revue@aliai.lu](mailto:revue@aliai.lu)

POSTDOC 05.09.2012  
NEXT DEADLINES:  
PHD 26.09.2012



## PhD and Postdoc Grants for Public-Private Partnerships See what's behind.

Through its **AFR Grant Scheme**, the National Research Fund Luxembourg (FNR) supports **PhD and Postdoc researchers** in Luxembourg and abroad. Next to offering grants for research projects carried out in public research institutions, AFR strongly encourages research projects performed **as public-private partnerships (PPP) with Luxembourg-based companies**. The salary of the PhD or Postdoc researcher who will work on a research project as a member of the company's staff will be paid through the AFR-PPP grant scheme, whereas the full costs of the research will be borne by the company. In order to benefit of the **financial support** for PPP under AFR, an innovative research project needs to be developed jointly by the PhD/Postdoc candidate, the private company and a public research institution in Luxembourg or abroad. AFR contributes to the development of human resources in Luxembourg research, translated in the long term by an increased number of qualified researchers pursuing a research career beyond their period of AFR funding.

Interested in hosting an AFR fellow during his or her PhD or Postdoc training? Go and see what's behind on [www.afr.lu/en/AFR-Grants-Activities/Public-Private-Partnerships-under-AFR](http://www.afr.lu/en/AFR-Grants-Activities/Public-Private-Partnerships-under-AFR) or send an email to [afr@fnr.lu](mailto:afr@fnr.lu)

**AFR**  
FUNDING SCHEME  
FOR PHDS AND POSTDOCS  
(AIDES À LA FORMATION-RECHERCHE)



Fonds National de la  
Recherche Luxembourg  
INVESTIGATING FUTURE CHALLENGES