

# CAHIER SCIENTIFIQUE REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

CAHIER SCIENTIFIQUE BIANNUEL DE LA REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE 1 | 2011





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  
tel 45 13 54 fax 45 09 32

Rédacteur en Chef Michel Petit  
Responsable Revue Technique Sonja Reichert  
tel 26 11 46 42 email [revue@aliai.lu](mailto:revue@aliai.lu)  
Graphisme Bohumil Kostohryz

## EDITO\_

## L'innovation ouverte

### une nouvelle culture au sein de l'industrie

Au sein de Goodyear nous poursuivons depuis 2008 une politique de l'innovation ouverte et nous misons donc sur les partenariats public-privé dans nos projets de recherche. Entre-temps nous maintenons des réseaux d'experts dans cinq domaines stratégiques de la recherche de Goodyear. L'intégration de la recherche publique au Luxembourg dans nos réseaux, qui regroupent une vingtaine d'acteurs de huit pays en Europe, nous tenait particulièrement à cœur. Les compétences offertes par l'université et par les centres de recherche publique au Luxembourg sont d'une haute qualité et complémentarité pour Goodyear. La preuve en est que près d'un tiers de nos projets public-privé en Europe sont réalisés par un partenaire public luxembourgeois.

La volonté d'adopter une culture de la recherche collaborative est commune à beaucoup d'industries au Luxembourg. Les clusters mis en place par Luxinnovation profitent tous d'une gestion commune par le secteur privé et public et représentent donc des plateformes idéales pour promouvoir d'une façon concrète la valeur ajoutée d'un travail de recherche en commun tout en assurant au maximum un retour sur investissement au niveau national et au delà. En effet, l'attractivité de la recherche made in Luxembourg en profite et devra se manifester dans des meilleurs taux de participation et de réussite des partenaires luxembourgeois au sein des projets de recherche commune de la Commission Européenne.

En général, la motivation des entreprises d'entamer une recherche commune avec un partenaire public se base en plus d'un besoin concret en technologie sur une politique ciblée de recrutement et sur la nécessité de contribuer activement au développement des talents des futurs chercheurs. En effet, un projet de recherche commun reflétant l'esprit de l'innovation ouverte se réalise à niveau égal et se base sur des valeurs de respect et de confiance. Chez Goodyear après trois ans de recherche ouverte les premiers chercheurs des projets public-privé poursuivent leur carrière professionnelle dans notre centre d'innovation à Colmar Berg.

Les instruments d'aide à la recherche privée et publique respectifs sont bien établis au Luxembourg et sont essentiels pour Goodyear et bien d'autres entreprises pour pouvoir entamer des projets de recherche commune visant souvent un objectif à moyen ou long terme. Il sera important d'adapter ces instruments spécifiquement à la nature des projets de recherche public-privé et les accords de coopération entre Luxinnovation et le Fonds national de la Recherche vont certes en tenir compte.

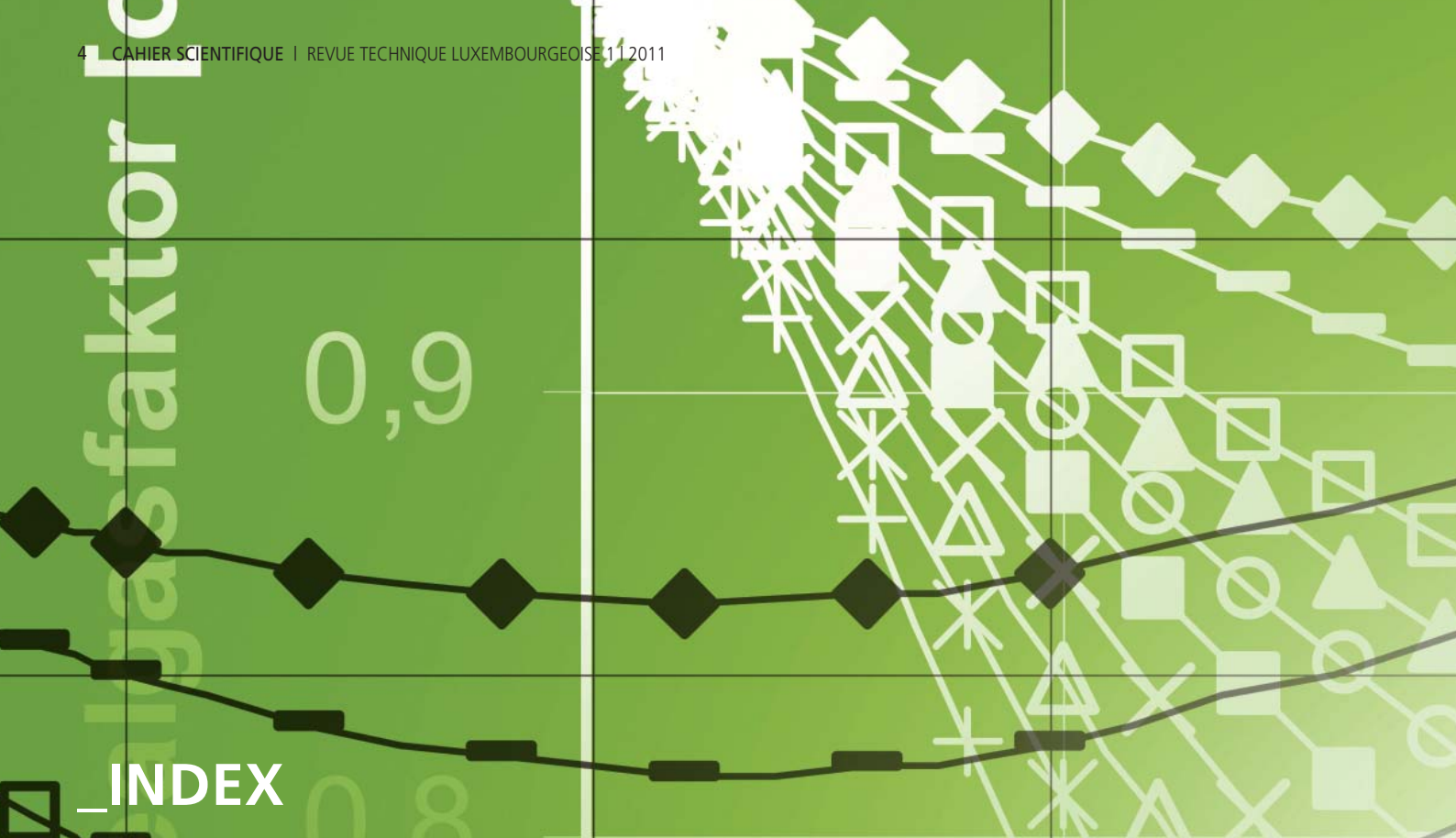
Les cahiers scientifiques offrent une excellente tribune de promotion de la recherche au Luxembourg et permettent de démontrer que la qualité scientifique et l'impact économique vont de pair. La troisième édition des cahiers scientifique en sera, à n'en pas douter encore une belle démonstration.

Bonne lecture

Dr. Georges Thielen

*Président du Luxembourg Materials Cluster et Manager External Science and Technology, Goodyear Innovation Center Luxembourg*





- 6\_ ENTWICKLUNG EINES REGIONALEN HOLZENERGIE-MASTERPLANS  
Ing. dipl. Dan Koster
- 10\_ THERMODYNAMISCHE ZUSTANDSÄNDERUNGEN REALER GASE  
Dr. Thomas ANDREAS, Leiter F&E, Rotarex
- 18\_ DAS ZWEIRAD ALS FAHRENDES PENDEL  
Ing. dipl. Henri Muller
- 22\_ INDUSTRY WATER  
Dr. Paul Schosseler, Dr. Denis Pittois, Ing. dipl. Alexandre Bertrand
- 28\_ HOCHWASSERABFLÜSSE DER MOSEL  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Sartor
- 36\_ WASSERQUALITÄT IN LUXEMBURGISCHEN FLÜSSEN  
Bob Bertemes, Pit Schwartz
- 40\_ TOWARDS A SUSTAINABLE INDIVIDUAL MOBILITY  
Gil Georges
- 46\_ ENERGY CONSUMPTION ASSESSMENT OF DIFFERENT SUPERMARKET REFRIGERATION CONFIGURATIONS  
Ing. dipl. Alexandre Bertrand, Ing. dipl. Dan Koster

\_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

Ing. Dipl. Dr. en mécanique Alain Louge  
Directeur de Recherches et de Développement  
Groupe Eurobéton

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 KOSTOHRÝZ | boshua

publiée par\_



**A.L.I.A.I**

Association Luxembourgeoise des Ingénieurs, Architectes et Industriels  
www.aliai.lu

partenaires de la revue\_



revue imprimée sur du papier\_



Steigende Preise fossiler Energieträger wie Öl und Gas, verstärkte Anstrengungen im Klimaschutz und vermehrtes Bewusstsein zur Reduzierung der Energieimportabhängigkeit motivieren Haushalte, Kommunen und Unternehmern zum Umstieg auf alternative Energieträger. Neben Sonnen- und Windenergie erlebt vor allem in ländlichen Gebieten die Biomasse in Form von Biogas und Energieholz einen enormen Zuwachs.

am Beispiel des Kanton Redange

# ENTWICKLUNG EINES REGIONALEN HOLZENERGIE-MASTERPLANS

Ing. dipl. Dan Koster

## Problemstellung

Im EU-Projekt SEMS (Sustainable Energy Management Systems), unterstützt von der EU im 6. Forschungsrahmenprogramm, haben sich die Stadt Slubice (PL), die Verbandsgemeinde Weilerbach (DE), die Stadt Tulln (AT) und der Kanton Redange (LU) ambitionierte Ziele gesteckt. Treibhausgasemissionen sollen durch einen umfangreichen Maßnahmenkatalog gesenkt werden, während die Anteile erneuerbarer Energien gesteigert werden sollen. Unterstützt werden die Kommunen durch Forschungspartner wie das IFAS (Birkenfeld - D), das IZES (Saarbrücken - D) und das CRP Henri Tudor, methodische Ansätze wie Stoffstrommanagement und technische Hilfsmittel wie dezentrale Energiemanagementsysteme.

Das CRP Henri Tudor erstellt in Zusammenarbeit mit Akteuren aus dem Kanton Redange einen Holzenergie-Masterplan, der den Gemeinden eine realistische Einschätzung ihrer Potentiale geben soll und Maßnahmen aufzeigt wie diese Potentiale mobilisiert werden können. Schwerpunkt der Untersuchung sind Potentiale und Maßnahmen zur Holzhackschnitzelnutzung.

## Der Rohstoff Holz

Holz als Energieträger ist in vielfältiger Form verfügbar und fällt an verschiedensten Stellen entweder als Reststoff an oder wird als eigentliches Produkt zur Energieversorgung produziert. Der Rohstoff Holz als Energieträger steht heute jedoch sowohl als Produkt, als auch in Form des Reststoffes, in Konkurrenz zu verschiedensten anderen Verwendungsmöglichkeiten. Zur Entwicklung eines nachhaltigen Holzenergie-Masterplans ist es daher wichtig die Konkurrenzsituationen zu erkennen, zu berücksichtigen und die beteiligten Akteure einzubinden. Wissenschaftlich basierte Methoden können dabei helfen die Stoffströme zu optimieren.

## Stoffstrommanagement

Die angewandte Methodik kann unter dem Überbegriff (Energie- und) Stoffstrommanagement zusammengefasst werden. Ziel des Stoffstrommanagements ist die nachhaltige Umleitung regionaler Stoffströme im Sinne der Schaffung ressourceneffizienter und gesamtheitlich optimierter Nutzungspfade und die Schließung regionaler Stoffkreisläufe. Im Sinne der Nachhaltigkeit müssen ökonomische Aspekte

ebenso einbezogen werden wie ökologische und soziale Gesichtspunkte.

## Akteurseinbindung

Insbesondere vor dem Hintergrund der Akzeptanz der resultierenden Maßnahmen und um realistische Einschätzungen der Markt- und Konkurrenzsituation zu erhalten, ist die Einbindung der Akteure von großer Bedeutung. Daher wurde der vorliegende Masterplan mit den verschiedenen Akteuren aus dem Forstbereich, betreffend der Potentiale und der Mobilisierung von Ressourcen durchgesprochen. Gemeindevertreter waren eingebunden um technische Fragestellungen zu bestehenden und geplanten Holzenergieanlagen zu klären und die Nutzung des Gemeindewaldes zu erörtern.

## Potentialbetrachtung

Erster Schritt zur Entwicklung eines Holzenergie-Masterplanes ist die Bestimmung der bestehenden Potentiale für Waldholz, Alt- und Restholz, holzartigem Grünschnitt und zur Holzpelletherstellung.

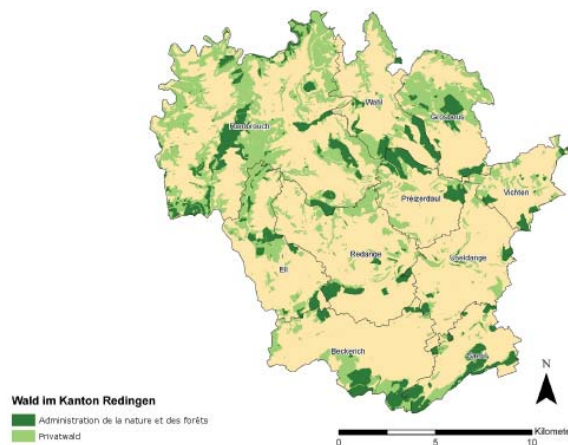


Abbildung 1\_ Waldstruktur im Kanton Redange

Die Waldstruktur des Kantons ist in Abbildung 1 dargestellt - der Waldanteil im Kanton Redange beträgt 31,8%, was 8.505 ha entspricht. Basierend auf einem digitalen Höhenmodell in einem geographischen Informationssystem (GIS) wurden Flächen mit einer Steigung größer 60% von der

Gesamtwaldfläche abgezogen und Abschlüsse für Erschließungsinfrastruktur vorgenommen.

Das gesamte Berechnungsmodell ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt und wird nachfolgend erklärt.

Grundlage einer nachhaltigen Nutzung des Waldholzes ist es, vereinfacht gesagt, die Entnahme des Holzes im Gleichgewicht zur nachwachsenden Holzmenge zu halten. Aus diesem Grund wurden nach Absprache mit den örtlichen Forstämtern sogenannte Hiebsätze für bestimmte Waldbestände (Baumarten) definiert. Diese beschreiben wie viel Festmeter Holz pro Hektar und Jahr entnommen werden können.

Für die einzelnen Waldbestände wurden desweiteren Anteile für „Stamm- und Furnierholz“ (hochwertigere Holzsortimente) und „Energie- und Industrieholz“ festgelegt, da nur die Holzsortimente einer energetischen Verwertung zugeführt werden, die sich nicht für eine hochwertigere Verwendung eignen. Die Forstwirtschaft zielt darauf ab möglichst hohe Anteile an hochwertigen Holzsortimenten zu gewinnen – einerseits wegen der höheren Wertschöpfung andererseits aus Gründen des Klimaschutzes: Diese Produkte ermöglichen es durch ihre längere Lebensdauer (z.B. Möbel oder im Holzbau) das während ihrer Lebensphase aufgenommene CO<sub>2</sub> möglichst lange zu speichern. Nach dem Prinzip der Kaskadennutzung kann dieses Holz am Ende seiner Lebensdauer immernoch einer energetischen Verwertung zugeführt werden.

Dennoch besteht eine Konkurrenzsituation zwischen Industrie- und Energieholz, da beide Nutzungspfade auf die gleichen minderwertigen Holzsortimente zurückgreifen. Zur Berücksichtigung von konkurrierender Nachfrage für Energie- und Industrieholz wurden Szenarien entwickelt.

Auch innerhalb des Energieholzes gibt es konkurrierende Nachfrage nach Hackschnitzeln zur Versorgung größerer Anlagen und Scheitholz für die Haushalte. Auch diese Anteile werden als Variable in die Szenarien eingeführt.

Die Szenarien spiegeln neben der Nutzungskonkurrenz eine weitere Problematik wieder – die Besitzverhältnisse: 70% der Waldflächen befinden sich in privatem Besitz, während die verbleibenden 30% öffentlicher Wald zum Großteil den

Kommunen zufallen und von den Forstverwaltungen bewirtschaftet werden. Der Privatwald dagegen wird aus verschiedenen Gründen oftmals kaum durchforstet und trägt damit momentan nur wenig zur Holzproduktion bei. Der zukünftige Mobilisierungsgrad des Privatwaldes wird daher in den Szenarien ebenfalls berücksichtigt und spielt eine große Rolle bei der Bestimmung der resultierenden Waldholzpotentiale.

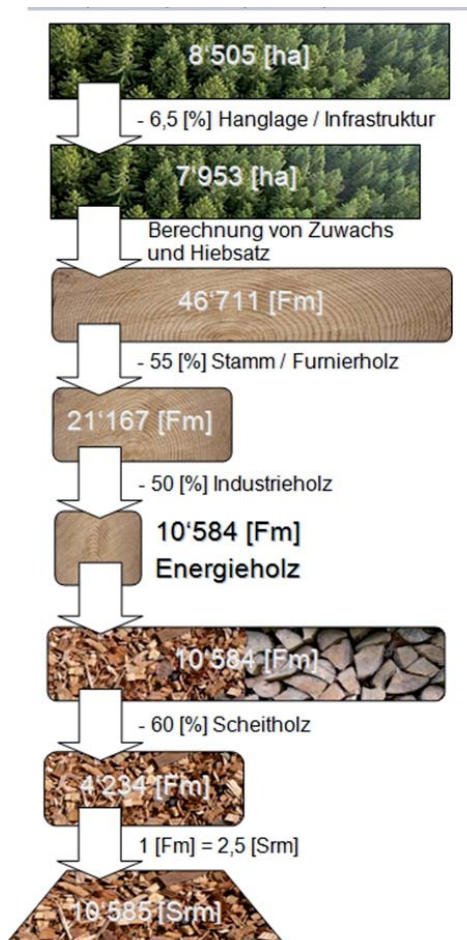


Abbildung 2\_Schema zur Potentialberechnung für Hackschnitzel aus Waldholz



Szenario [Srm]	Beckerich	Eil	Grosbous	Préizerdail	Rambrouch	Redange	Saeul	Useldange	Vichten	Wahl
Szenario „50 / 50“	2'126	1'993	2'952	1'494	10'509	1'938	1'585	944	900	2'019
Szenario „Holzenegie Gemeinden“	1'739	1'124	1'234	1'563	4'876	938	2'158	572	551	1'373
Szenario „b.a.u.“	348	225	247	313	975	188	432	114	110	275
Szenario „Holzenegie 2020“	748	595	790	597	2'916	546	739	290	278	652

Tabelle 1\_Energieholzpotentiale für Hackschnitzel aus Waldholz nach verschiedenen Szenarien

Vier Szenarien wurden im Rahmen der Potentialerfassung entwickelt.

Das **Szenario „50 / 50“** stellt das gesamte, max. Energieholzpotential in den Gemeinden dar (öffentlicher Wald und Privatwald), wenn weiterhin ein Teil des minderwertigen Holzes (50%) als Industrieholz abgegeben wird.

Im **Szenario „Holzenegie Gemeinden“** wird davon ausgegangen, dass die Gemeinden durch verstärkten Bedarf an Energieholz zum Betrieb kommunaler Hackschnitzelanlagen ihre gesamten Energieholz-Ressourcen mobilisieren und kein minderwertiges Holz an die Industrie abgeben. Der Privatwald bleibt unberücksichtigt.

Basis des **Szenario „Business as usual“** ist der Gedanke das es keine einschneidenden Veränderungen in der Holzpolitik der Gemeinden gibt. Somit werden keine verstärkten Anstrengungen unternommen den Privatwald zu mobilisieren, weiterhin wird im Schnitt die Hälfte des minderwertigen Holzes als Industrieholz verkauft und 60% des Energieholzes werden in Form von Scheitholz abgegeben.

Das **„Szenario Holzenegie 2020“** setzt erhöhte Anstrengungen zur Privatwaldmobilisierung voraus, z.B. durch Flurbereinigung, Wegebau und der Einrichtung von Holzhöfen. Wie bisher sollte ein Teil des minderwertigen Waldholzes an die Industrie verkauft werden. Der Anteil des Scheitholzes wurde reduziert zu Gunsten der Hackschnitzelproduktion, da mittelgroße Anlagen bessere Wirkungsgrade und niedrigere Emissionswerte aufweisen als kleine, dezentrale Öfen in den Haushalten und eine Kraft-Wärme-Kopplung realisiert werden kann.

Die daraus resultierenden Energieholzpotentiale für Schüttraummeter [Srm] Holzhackschnitzel aus Waldholz sind in Tabelle 1 dargestellt.

#### Potential holzartiger Grünschnitt

Ein zusätzliches Potential ist der holzartige Grünschnitt aus der Straßen- und Landschaftspflege, von kommunalen Grünflächen und Privathaushalten.

Mit Hilfe nationaler Statistiken und Berechnungsansätzen für anfallende Grünschnittmengen aus der Straßenpflege konnte ein Potential von ca. 700 t pro Jahr ermittelt werden. Aus der Praxis kann berichtet werden das die Ge-

meinde Beckerich bereits einen großen Teil seines aktuellen Hackschnitzelbedarfs durch Beimischung von Landschaftspflegematerial deckt.

#### Regionale Verwertung von Alt- und Restholz

Alt- und Restholzpotentiale auf nationaler Ebene ergeben sich aus den Abfallstatistiken. Ein daraus errechneter Einwohnerkennwert erlaubt (vereinfacht) das Herunterbrechen des Potentials auf Ebene des Kantons. Allerdings ist dies ein theoretischer Ansatz denn in der Praxis sind diese Potentiale stark an regionale holzverarbeitende Betriebe gebunden. Das errechnete Potential beläuft sich auf ca. 1000 t pro Jahr. Entsorgungsunternehmen in Luxemburg verfügen über weit größere Potentiale an unbelastetem Altholz die in geeigneten Anlagen mit entsprechender Genehmigung verwendet werden können.

Potentiale zur Herstellung von Pellets ergeben sich aus größeren holzverarbeitenden Betrieben wie Sägereien o.ä., da hier der vorwiegend genutzt Rohstoff (Sägespäne) anfällt. Da diese im Kanton nicht (kaum) vorhanden sind kann dieses Potential vernachlässigt werden.

#### Bedarfssituation

Gegenüber dem verfügbaren Potential für Energieholz steht die Nachfrage im Kanton. Die Analyse des bestehenden Bedarfs an Holzhackschnitzeln für die Versorgung der drei bestehenden Anlagen im Kanton in den Gemeinden Bettborn, Redange und Beckerich basiert auf Befragungen der Betreiber – in dieser Publikation nur grob dargestellt. Außerdem wurden geplante neue Anlagen und die Erweiterungen bestehender Anlagen in die Kalkulation mit eingeschlossen. Der Bedarf an Scheitholz konnte leider nicht bestimmt werden da diesbezüglich kaum Daten vorliegen.

Berücksichtigt man den momentan aus den öffentlichen Waldflächen gedeckten Bedarf an Hackschnitzeln und das bestehende Potential ohne Privatwaldmobilisierung (Szenario „Holzenegie-Gemeinden“) können alle drei Gemeinden ihren Bedarf auf nachhaltige Weise aus den öffentlichen Waldflächen decken (vergleiche Abbildung 3). Allerdings geschieht dies teilweise auf Kosten einer Reduzierung der Holzmengen die für Industrieholz bereitgestellt werden können – eine Konsequenz deren sich die Gemeinden bewusst sein müssen.



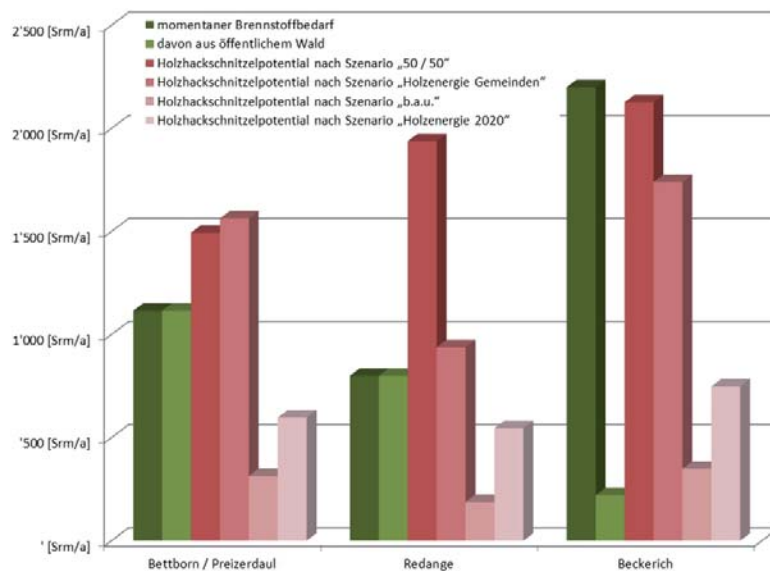


Abbildung 3\_Gegenüberstellung des Brennstoffbedarfs der bestehenden Anlagen und der Hackschnitzelpotentiale nach den berechneten Szenarien

Zur Abschätzung der zukünftigen Bedarfsentwicklung wurden verschiedene Gemeinden im Kanton befragt die die Errichtung neuer Anlagen teilweise bereits seit Jahren diskutieren. Zum Zeitpunkt der Befragung bestanden allerdings in keiner der Gemeinden konkrete Planungen. Daher wurden nur die mittel- bis langfristig angedachten Erweiterungen der Anlagen in Beckerich und Redange mit einbezogen.

Nimmt man das Szenario „Holzenergie-Gemeinden“ als Referenz, da dieses Szenario die Ressourcenverfügbarkeit aus dem öffentlichen Wald in den Gemeinden repräsentiert, überschreitet der Bedarf nach Ausbau der Anlagen das bestehende Angebot nach den Annahmen des Szenarios. Mittel- bis langfristig muss demnach auch Landschaftspflegematerial, wie bereits heute in Beckerich praktiziert, Teile des zusätzlichen Bedarfs auffangen. Außerdem besteht die Möglichkeit, sofern die genehmigungsrechtlichen Fragen geklärt werden können, geeignete Altholzsortimente zu verwenden. In Redange ist letzteres technisch nicht ohne weiteres möglich.

Es wird auch auf absehbare Zeit möglich sein die Anlagen zu versorgen, nur wird der Hackschnitzelbedarf vermehrt in Konkurrenz stehen zur Versorgung der Bevölkerung mit Scheitholz, bzw. der Versorgung der Industrie mit minderwertigen Holzsortimenten.

#### Potential Privatwaldmobilisierung

Der Schlüssel zu einer langfristig abgesicherten und nachhaltigen Brennstoffversorgung liegt in der Mobilisierung des Privatwalds. Wie eingangs erwähnt, befinden sich 70 % des Waldes im Kanton Redange in Privatbesitz (rund 5.900 ha). Die Administration de la nature et forêts verwalten den verbleibenden Anteil von 26% Kommunalwald (rund 2.190 ha), 3% Staatswald und 1% öffentliche Einrichtungen.

Eine verstärkte Mobilisierung des Privatwaldes benötigt das Zusammenspiel vielfältiger Maßnahmen welche teilweise langfristige Prozesse darstellen:

„eine umfassende Waldflurbereinigung

„Anlage von Waldwegen

„spezielle Aufrufe zu gemeinsamen Durchforstungen, wie von der Privatwaldvereinigung angeboten

„Angebote der Kommunen an die Waldbesitzern zum Ankauf von Holz zur Versorgung der Hackschnitzelanlagen

„Verstärkte Kooperation der Privatwaldbesitzer, der Privatwaldvereinigung und der Kommunen

„Sensibilisierung und Fortbildung

Ein wichtiger Beitrag zur Schaffung besserer Marktbedingungen für Privatwaldbesitzer kann die Einrichtung von Energieholzhöfen sein. Durch den Aufbau gemeinsamer Strukturen kann die schwache Marktposition der einzelnen Besitzer gestärkt werden. Dies kann an manchen Standorten eventuell durch die Erweiterung bestehender Hackschnitzellagerhallen und deren Infrastruktur, beispielsweise in Public-Private-Partnership geschehen.

#### Fazit

Die Energieholzpotentiale aus Waldflächen im Kanton belaufen sich insgesamt auf 26.459 [Srm] nach Szenario „50/50“, was einer Nutzung aller minderwertigen Waldholzpotentiale entspricht (Privatwald und öffentlicher Wald) und 50% der dieser Holzsortimente als Industrieholz zur Verfügung stellt. Insbesondere die Gemeinden mit bestehenden Anlagen sollten im Fall einer Erweiterung der Systeme aber auch die Reststoffpotentiale in ihre Versorgungsstruktur integrieren. Die Gemeinden die noch keine Hackschnitzelanlagen errichtet haben, verfügen teils über nicht unerhebliche Waldholzpotentiale - insbesondere die Gemeinde Rambrouch mit ca. 4.876 [Srm] aus dem öffentlichen Wald (Szenario „Holzenergie Gemeinde“). Generell wäre zu prüfen ob ein Energieholzhof im Norden des Kantons, bei entsprechendem Aufbau von Holzheizwerken in den Gemeinden Rambrouch, Wahl und/oder Grosbous, nicht die gemeinsame Versorgung solcher Anlagen übernehmen kann. Gleichzeitig böte dies Möglichkeiten zur Mobilisierung des Privatwaldes. Somit können Bürger, Unternehmen und Kommunen durch gemeinsame Initiativen und intelligente Umsetzung durch nachhaltige, energetische Holznutzung den regionalen Mehrwert in der Region erhöhen, zu einer kostengünstigen und preisstabilen Energieversorgung beitragen und Treibhausgasemissionen reduzieren.

Ing. dipl. Dan Koster, Senior R&D Engineer  
korrektur Bianca Schmitt

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



# THERMODYNAMISCHE ZUSTANDSÄNDERUNGEN REALER GASE\_

Dr. Thomas ANDREAS, Leiter F&E, Rotarex

## Technische Gase und deren Speicherung bei hohen Drücken

Die Einsatzmöglichkeiten Technischer Gase sind vielfältig, erschließen sich Außenstehenden aber erst bei genauerer Betrachtung. So gibt es kaum Prozesse, Verfahren und Einsatzgebiete, sei es in Forschung & Entwicklung, Industrie, Handwerk, Medizin oder privaten Lebensbereichen, in denen keine Technischen Gase zum Einsatz kommen. Ob zum Schweißen, Brennen oder Schneiden von Metallen, zum Kühlen von Lebensmitteln, zur medizinischen Versorgung von Patienten, zur Herstellung von Mikrochips oder zum Antrieb von Maschinen, Fahrzeugen und Anlagen, überall kommen Technische Gase zum Einsatz. Die dabei verwendeten Gase sind genau so vielfältig wie deren Einsatzgebiete.

Allen Gasen gleich ist die Art der Speicherung in speziellen Speicherbehältern unter hohem Druck. Vereinzelt werden die Gase tiefkalt in flüssiger Form gespeichert, und einige Gase bilden sogar bei Raumtemperatur eine Flüssigphase aus, aber die überwiegende Anzahl der unterschiedlichen Gase werden in der Regel einphasig unter hohem Druck gespeichert.

Bei der Befüllung und Entnahme dieser Gase treten aufgrund thermodynamischer Zustandsänderungen zum Teil hohe Temperaturschwankungen auf, die berücksichtigt und exakt quantifiziert werden müssen.

Insbesondere die Entnahme der Gase ist als besonders kritisch einzustufen. Hierbei können sich, abhängig von den Randbedingungen, isenthalpe oder isentrope Zustandsänderungen einstellen. Die Temperaturschwankungen sind von der Art des Gases, von Anfangsdruck und -temperatur, der Höhe der Druckentspannung und von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases abhängig.

Aufgrund neuer Entwicklungen in der Behältertechnik, aber auch aufgrund zunehmender Forderungen nach Ressourcen- und Energieeffizienz, werden immer weniger Behälter verwendet, befüllt und transportiert, dafür aber die Speicherdrücke immer weiter erhöht. Vor einigen Jahren galt ein Speicherdruck von 300 bar bereits als überaus hoch, inzwischen werden für unzählige Anwendungen Drücke von 700 bar diskutiert.

Die Gase müssen jedoch für die späteren Anwendungen nach wie vor auf niedrige Druckstufen reduziert werden, d.h. bei deutlich erhöhten Speicherdrücken und gleichen Anwendungsdrücken, ergeben sich verhältnismäßig große Druckstufen bei der Expansion der Gase auf für die Verbraucher geeignete Enddrücke. Dadurch entstehen z.T. extrem große Temperaturschwankungen (Abkühlungen und Erwärmungen), die zu erheblichen technischen Problemen führen können.

Mögliche, unerwünschte Effekte durch Abkühlung sind:

- \_Kondensation von im Gas enthaltenen Wasser → Gefahr von Korrosion
- \_Kondensation von Luftfeuchtigkeit auf der Außenseite → Gefahr von Korrosion
- \_Flüssiggasbildung bzw. Ausbildung einer festen Gasphase und Vereisung → Gefahr der Verstopfung der Gasleitung und Armaturen sowie Beeinträchtigung der Funktion der Armaturen

Mögliche, unerwünschte Effekte durch Erwärmung sind:

- \_Die gefürchtete sog. adiabatische Kompression, die auftritt, wenn Gase bei der Expansion auf Leitungsverschlüsse oder starke Leitungseinschnürungen treffen, kann zu Bränden und Gaszersetzungen (Acetylenzersetzung) mit hohen Gefährdungspotenzialen führen
- \_Beeinträchtigung der Funktion der Armaturen durch stark erhitze Abdichtungselemente

Derartige Einschränkungen können, wenn die Anwendung dies erfordert, durch zusätzlichen gerätetechnischen Aufwand innerhalb des Gasmanagementsystems bzw. der Gasversorgungseinheit kompensiert werden. Zusätzlicher gerätetechnischer Aufwand ist aber oftmals mit erhöhten Kosten und anderen negativen Begleiterscheinungen verbunden.

Exakte Berechnung von Temperaturänderungen bei isenthalpen und isentropen Zustandsänderungen als Ausgangsbasis für das richtige Gasmanagementsystem

Um zunächst eine Aussage zu treffen, ob in Abhängigkeit der spezifischen Anwendung und Gasart zusätzlicher gerätetechnischer Aufwand betrieben werden muss bzw. dar-

auf verzichtet werden kann, benötigt man im Vorfeld Berechnungsdaten über die exakten Temperaturänderungen der verschiedenen zur Anwendung kommender Gase bei isenthalpen und isentropen Zustandsänderungen.

Zur Zeit sind leider keine geeigneten Berechnungsmethoden vorhanden, die es erlauben die Temperaturänderungen von realen Gasen bei isenthalper oder isentroper Zustandsänderung über sehr große Druckbereiche exakt zu berechnen. In der Literatur beschriebene bzw. in Normen und Richtlinien angegebene Gleichungen, führen durch vereinfachende Annahmen zu ungenauen und teilweise irreführenden Ergebnissen.



Bild 1\_ Gasversorgungseinheit für stationäre Einsatzgebiete

Nachfolgend wird eine neuartige Berechnungsmethodik vorgestellt, die es zulässt, derartige Temperaturänderungen

gen exakt zu berechnen. Zunächst wird eine generelle Einführung in die Thematik aufgezeigt und die isenthalpe Zustandsänderung (sog. Joule-Thomson-Effekt) betrachtet. Es werden die relevanten Berechnungsgleichungen grundlegend, d.h. auf Basis der Fundamentalgleichung der Thermodynamik, abgeleitet und im weiteren Verlauf der differentielle und der integrale Joule-Thomson-Effekt ausführlich beschrieben. In einer späteren Ausgabe dieser Fachzeitschrift wird dann die isentrope Zustandsänderung und die adiabatische Kompression näher betrachtet.

Um eine Vorstellung von den praktischen Anwendungen zu erhalten, zeigen die Bilder 1 und 2 zunächst entsprechende Gasversorgungseinheiten, wie sie für viele unterschiedliche Einsatzgebiete verwendet werden. Grundsätzlich unterscheidet man dabei Gasversorgungseinheiten für stationäre Einsatzgebiete (Bild 1) und Gasversorgungseinheiten für mobile Einsatzgebiete (Bild 2).

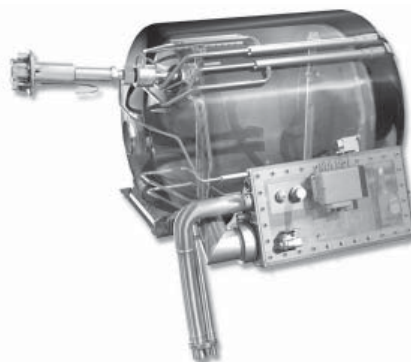


Bild 2\_ Gasversorgungseinheit für mobile Einsatzgebiete

Das Druckniveau eines Gases wird beim Durchströmen der Gasversorgungseinheit vom Speicherbehälter zum Verbraucher kontinuierlich abgebaut bzw. reduziert. Diese Druckreduzierungen erfolgen in entsprechenden Drossel- und Regeleinrichtungen, die zu den wichtigsten Systemkomponenten innerhalb eines kompletten Systemaufbaus zählen.

Thermodynamisch deutet man die adiabate gedrosselte Entspannung eines unter Druck stehenden Gases auf ein

niedrigeres Druckniveau als "Isenthalpe Expansion" und bezeichnet dieses Phänomen auch als "Joule-Thomson-Effekt". Aus Bild 3 geht hervor, dass die Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar vor und hinter der Drosselstelle konstant ist. In der Praxis gelten die Regeln für die isenthalpe Expansion bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 50 m/s, d.h. für die meisten Anwendungen gelten bei der Gasentnahme die Gesetzmäßigkeiten der isenthalpen Entspannung (sog. Joule-Thomson-Effekt).

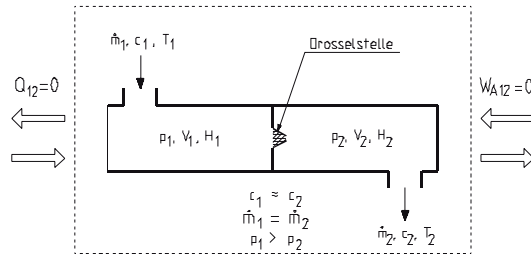


Bild 3\_ Physikalische Vorgänge bei der isenthalpen Entspannung eines realen Gases

Aus Bild 3 folgt mit der Energiegleichung für Strömungsvorgänge bei der gedrosselten Expansion eines Gases der Zusammenhang:

$$\underbrace{Q_{12}}_0 + \underbrace{W_{A12}}_0 = H_2 - H_1 + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot m \cdot (c_2^2 - c_1^2)}_0 + \underbrace{m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)}_0 \quad (1)$$

$$H_2 = H_1 \rightarrow H = \text{konst.} \rightarrow dH = 0 \quad (2)$$

Aus Gleichung (2) folgt, dass die Enthalpie vor und nach der Volumenänderung des Gases konstant bleibt, d.h. die Expansion verläuft ohne Änderung der Enthalpie.

Für ein ideales Gas ergäbe sich in einem solchen Fall überhaupt keine Temperaturänderung, denn für ein ideales Gas gilt die Beziehung:

$$H(T_2) = H(T_1) \rightarrow dT = 0$$

Speichert man Gase allerdings bei hohem Druck, gelten die vereinfachenden Beziehungen für ideale Gase nicht mehr. Dann muss das reale Gasverhalten berücksichtigt werden. Die Enthalpie eines realen Gases ist sowohl von der Temperatur als auch vom Druck abhängig, es gilt die Beziehung:

$$H(p_2, T_2) = H(p_1, T_1) \rightarrow dT \neq 0$$

Da die Enthalpie bei der gedrosselten Entspannung konstant bleibt, der Druck sich aber sehr stark ändert, muss sich bei einem realen Gas zwangsläufig auch die Temperatur ändern.

An dieser Stelle ist es nun angebracht etwas näher auf das reale Gasverhalten einzugehen (siehe auch Infokasten). Reale Gase unterscheiden sich von idealen Gasen dadurch, dass die Wechselwirkung der Moleküle bzw. der Atome untereinander berücksichtigt werden muss. Das ist u.a. genau dann der Fall, wenn nicht mehr ein verdünntes Gas vorliegt, sondern ein stark komprimiertes Gas, bei dem die intermolekularen Abstände innerhalb der Reichweite der Bindungsradien der Teilchen liegen. Darüber hinaus sind die Gasmoleküle bzw. -atome keine Punktmassen, sondern besitzen endliche Volumina, die ebenfalls entsprechend berücksichtigt werden müssen. Die Bilder 4 und 5 zeigen Realgaskennfelder von Methan und Wasserstoff. Realgasfaktor „1“ bedeutet ideales Gasverhalten. Abweichende Realgasfaktoren geben an, wie stark das jeweilige Gas bei

vorliegendem Druck und Temperatur vom idealen Gasverhalten abweicht.

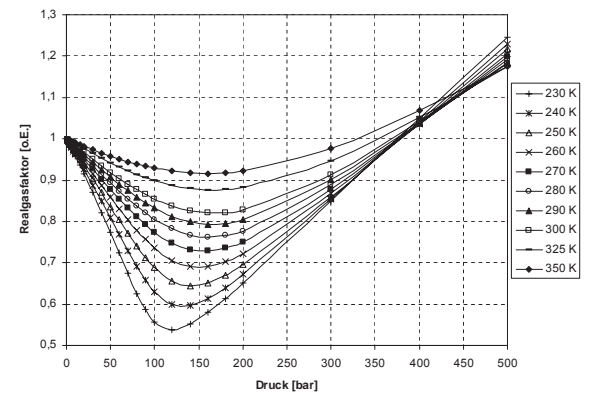


Bild 4\_ Realgaskennfeld von Methan

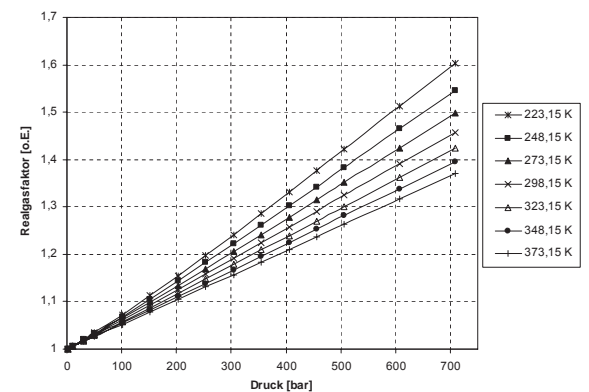


Bild 5\_ Realgaskennfeld von Wasserstoff

Durch die Vergrößerung des Gasvolumens bei der Expansion steigt der mittlere Abstand der Gasmoleküle. Bei diesem Vorgang wird innere Volumenarbeit geleistet. Da bei einem realen Gas wegen der zwischenmolekularen Wechselwirkungen und des Eigenvolumens der Moleküle die innere Energie volumen- und druckabhängig ist, ändert sich bei diesem Vorgang die Temperatur des realen Gases, obwohl dieser adiabat (ohne Wärmeübertragung) und gedrosselt (ohne äußere Arbeitsverrichtung) verläuft.

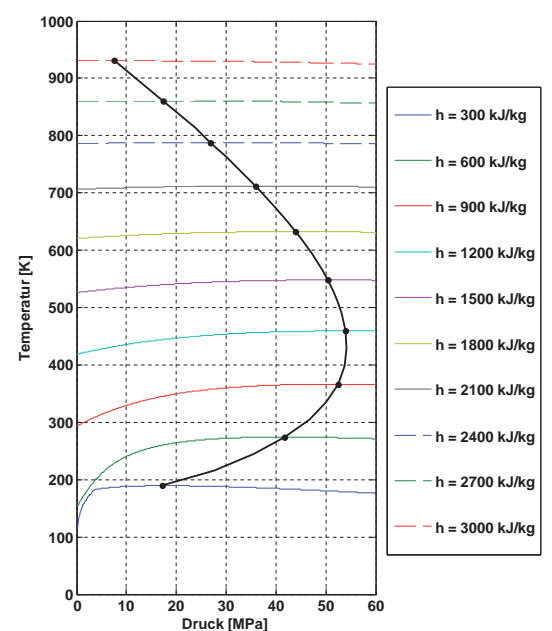


Bild 6\_ Verlauf der Inversionstemperatur von Methan

Das Gas kann sich dabei erwärmen oder abkühlen, je nachdem welche Steigung die zugehörige Isenthalpe im p-T-Diagramm gerade hat. Der Punkt der Isenthalpen mit der



Steigung Null markiert die Inversionstemperatur (vergleiche Bild 6 und Bild 7). Die Diagramme in Bild 6 und Bild 7 zeigen jeweils den Verlauf der Inversionstemperaturen von Methan und von Wasserstoff.

Befindet sich das Gas im Ausgangszustand innerhalb der Inversionskurve, so erfolgt bei der adiabaten gedrosselten Entspannung eine Abkühlung des Gases, weil es hierbei Arbeit gegen die anziehenden zwischenmolekularen Kohäsionskräfte leistet.

Befindet sich das Gas im Ausgangszustand außerhalb der Inversionskurve, so erfolgt bei der adiabaten gedrosselten Entspannung eine Erwärmung des Gases, weil das Eigenvolumen der Moleküle realer Gase als abstoßender Term den zwischenmolekularen Kohäsionskräften entgegenwirkt und dabei überwiegt.

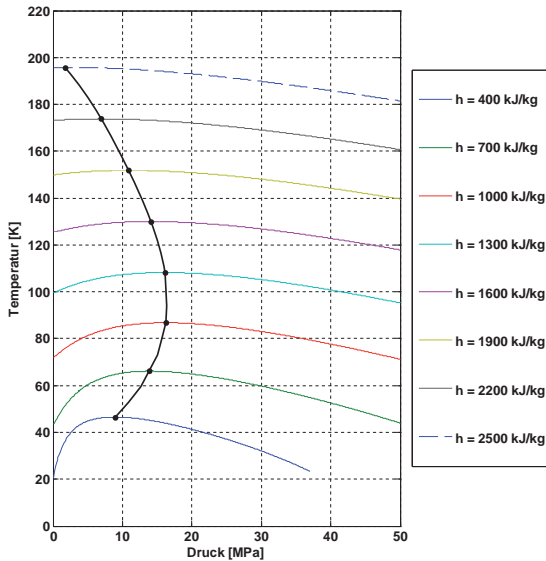


Bild 7\_ Verlauf der Inversionstemperatur von Wasserstoff

Da aber die Enthalpie bei einem realen Gas sowohl von der Temperatur als auch vom Druck abhängt, legt die folgende Bedingung fest, um welchen Betrag  $\partial T$  sich die Temperatur ändert, wenn sich der Druck um  $\partial p$  ändert:

$$H(p_2, T_2) = H(p_1, T_1) \quad (3)$$

Für eine infinitesimale Änderung gilt:

$$\mu_{JT} = \left[ \frac{\partial T}{\partial p} \right]_H = - \frac{\left[ \frac{\partial H}{\partial p} \right]_T}{\left[ \frac{\partial H}{\partial T} \right]_p} \quad (4)$$

Obige Gleichung (4) definiert den Joule-Thomson-Koeffizienten  $\mu_{JT}$ , der das Verhalten des realen Gases bei der adiabaten gedrosselten Entspannung beschreibt. Nachfolgend wird die Berechnungsgleichung zur exakten Bestimmung des Joule-Thomson-Koeffizienten bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen (Druck und Temperatur) sowie Gasarten hergeleitet.

Ausgangsbasis für die Herleitung dieser Gleichung ist die sog. Fundamentalgleichung der Thermodynamik, die in ihrer allgemeinen Form folgende Gestalt für die Änderung der inneren Energie hat

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, n_i} \cdot dS + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{S, n_i} \cdot dV + \sum_{i=0}^k \left( \frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{V, S, n_{j \neq i}} \cdot dn_i \quad (5)$$

Mit den Definitionen  $\left( \frac{\partial U}{\partial S} \right) = T$  und  $\left( \frac{\partial U}{\partial V} \right) = -p$  sowie der Annahme einer konstant bleibenden Stoffmenge, kann diese Gleichung wie folgt geschrieben werden

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV \quad (6)$$

Für die Enthalpie und die Änderung der Enthalpie gelten folgende Beziehungen

$$H = U + p \cdot V \quad (7)$$

$$dH = dU + d(p \cdot V) = dU + p \cdot dV + V \cdot dp \quad (8)$$

Setzt man Gleichung (6) in Gleichung (8) an, ergibt sich

$$dH = T \cdot dS - p \cdot dV + p \cdot dV + V \cdot dp \quad \text{bzw.}$$

$$dH = T \cdot dS + V \cdot dp \quad (9)$$

Das totale Differential der Entropie eines realen Gases lautet

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_p \cdot dT + \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T \cdot dp \quad (10)$$

Die erste Ableitungsfunktion in Gleichung (10) kann wie folgt dargestellt werden

$$\left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{C_p}{T} \right) \quad (11)$$

Der zweite Ableitungsterm in Gleichung (10) kann über eine sog. Maxwell-Relation auch durch die Ableitung einer anderen thermodynamischen Zustandsfunktion ausgedrückt werden. Es gilt

$$\left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T = - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (12)$$

Werden die beiden Ausdrücke nach Gleichung (11) und Gleichung (12) in Gleichung (10) eingesetzt, folgt für die Änderung der Entropie eines realen Gases die Gleichung

$$dS = \frac{C_p}{T} \cdot dT - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \cdot dp \quad (13)$$

Nun kann Gleichung (13) in Gleichung (9) eingesetzt werden, und es folgt für die Änderung der Enthalpie, die bei isenthalper Expansion definitionsgemäß Null ist, die Gleichung

$$dH = T \cdot \left( \frac{C_p}{T} \cdot dT - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \cdot dp \right) + V \cdot dp = 0 \quad (14)$$

Zur weiteren Betrachtung ist es sinnvoll spezifische Größen, d.h. auf die Masse bezogene Größen, zu verwenden. Demzufolge erhält Gleichung (14) ein anderes Aussehen

$$d h = T \cdot \left( \frac{c_p}{T} \cdot d T - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot d p \right) + v \cdot d p = 0 \quad (15)$$

Aus dieser Gleichung (15) kann nun direkt der Ausdruck zur Berechnung des differentiellen Joule-Thomson-Effektes (sog. Joule-Thomson-Koeffizient) gebildet werden

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_H = \frac{1}{c_p} \cdot \left[ T \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] \quad (16)$$

Damit der Joule-Thomson-Koeffizient jetzt bei beliebigen Ausgangsdrücken und -temperaturen berechnet werden kann, muss der Ableitungsterm  $\left( \partial v / \partial T \right)_p$  in der Klammer durch den Realgasfaktor ausgedrückt werden. Dazu wird die individuelle Gasgleichung der Form

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \cdot Z(p, T) \quad \text{bzw.} \\ p \cdot v = R_i \cdot T \cdot Z(p, T) \quad (17)$$

nach der Temperatur abgeleitet und man erhält den Ausdruck

$$\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R_i}{p} \cdot \left( \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \cdot T + Z(p, T) \right) \quad (18)$$

Anschließend wird Gleichung (18) in Gleichung (16) eingesetzt, und es ergibt sich die folgende Gleichung für  $\mu_{JT}$

$$\mu_{JT} = \left[ \frac{\partial T}{\partial p} \right]_h = \frac{1}{c_p(p, T)} \cdot \left[ T \cdot \left( \frac{R_i}{p} \cdot \left( \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \cdot T + Z(p, T) \right) \right) - \frac{R_i \cdot T}{p} \cdot Z(p, T) \right] - v \quad (19)$$

Wird nun über die Gasgleichung (17) ausgedrückt und in Gleichung eingesetzt, ergibt sich die folgende Beziehung für den Joule-Thomson-Koeffizienten

$$\mu_{JT} = \left[ \frac{\partial T}{\partial p} \right]_h = \frac{1}{c_p(p, T)} \cdot \left[ T \cdot \left( \frac{R_i}{p} \cdot \left( \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \cdot T + Z(p, T) \right) \right) - \frac{R_i \cdot T}{p} \cdot Z(p, T) \right] \quad (20)$$

Gleichung (20) kann erheblich vereinfacht werden und nimmt schließlich eine sehr kompakte Form zur Berechnung des Joule-Thomson-Koeffizienten  $\mu_{JT}$  an

$$\mu_{JT} = \frac{R_i \cdot T^2}{c_p(p, T) \cdot p} \cdot \left( \frac{\partial Z}{\partial T} \right)_p \quad (21)$$

Diese Gleichung (21) enthält neben den beiden intensiven Größen Druck und Temperatur noch die gasspezifischen Größen  $R_i$ ,  $c_p(p, T)$  und  $\left( \partial Z / \partial T \right)_p$ . Die beiden zuletzt genannten Größen sind bei realen Gasen eine Funktion von Druck und Temperatur. Die spezifische Wärmekapazität  $c_p(p, T)$  und die Ableitungsfunktion  $\left( \partial Z / \partial T \right)_p$  werden zur weiteren Bearbeitung in fein abgestuften

Kennfeldern hinterlegt, damit ein entsprechendes Berechnungsprogramm diese zur Ermittlung der Joule-Thomson-Koeffizienten nach Gleichung (21) verarbeiten kann. Zur Berechnung von Zwischenwerten kommen dabei unterschiedliche mathematische Interpolationsverfahren zum Einsatz.

Die folgenden Bilder 8 und 9 zeigen die berechneten Joule-Thomson-Koeffizienten der Gase Methan und Wasserstoff.

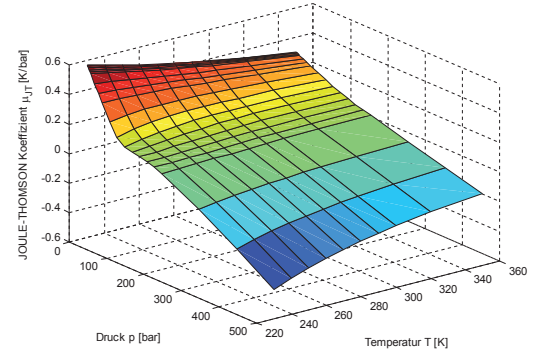


Bild 8\_ Verläufe des Joule-Thomson-Koeffizienten für Methan

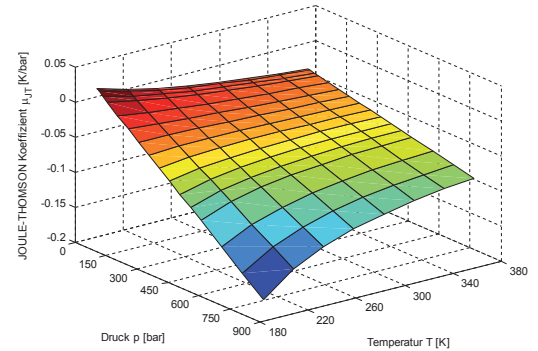


Bild 9\_ Verläufe des Joule-Thomson-Koeffizienten für Wasserstoff

Um nun eine Temperaturänderung bei der gedrosselten Entspannung über große Druckbereiche, in denen die relevanten Gase üblicherweise expandieren, zu berechnen, ist der integrale Joule-Thomson-Effekt anzuwenden, für den die folgende Gleichung gilt:

$$\int_{T_1}^{T_2} d T = \int_{p_1}^{p_2} \mu_{JT}(p, T) \cdot d p \quad (22)$$

Die Kurven des Joule-Thomson-Koeffizienten nach Bild 8 und Bild 9 können für beide Gase als Funktion von Druck (bei konstanter Temperatur) über Polynome höherer Ordnung wie folgt angenähert werden:

$$\begin{aligned} [\mu_{JT}(p)]_T = & \alpha + \beta \cdot p + \gamma \cdot p^2 + \delta \cdot p^3 + \dots \\ & \dots + \kappa \cdot p^{n-1} + \lambda \cdot p^n \end{aligned} \quad (23)$$

$\alpha \dots \lambda$  = konstante Koeffizienten

Jeder Verlauf des Joule-Thomson-Koeffizienten muss für eine feste Bezugstemperatur angenähert werden. Anschließend

kann gemäß folgender Gleichung integriert werden:

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = \int_{p_1}^{p_2} [\mu_{JT}(p)]_T \cdot dp \quad (24)$$

Wird Gleichung (23) in Gleichung (24) eingesetzt, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = \int_{p_1}^{p_2} \left( \alpha + \beta \cdot p + \gamma \cdot p^2 + \delta \cdot p^3 + \dots \right. \\ \left. \dots + \kappa \cdot p^{n-1} + \lambda \cdot p^n \right) \cdot dp \quad (25)$$

Nach der Integration von Gleichung (25) ergibt sich:

$$T_2 - T_1 = \left[ \alpha \cdot p + \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot p^2 + \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot p^3 + \frac{1}{4} \cdot \delta \cdot p^4 + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{1}{n} \cdot \kappa \cdot p^n + \frac{1}{n+1} \cdot \lambda \cdot p^{n+1} \right]_{p_1}^{p_2} \quad (26)$$

Bei der gedrosselten isenthalpen Entspannung eines Gases mit der Anfangstemperatur und dem Anfangsdruck auf den Enddruck gilt für die Temperatur nach der Entspannung gemäß Gleichung (26) folgender Zusammenhang:

$$T_2 = T_1 + \left[ \alpha \cdot p + \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot p^2 + \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot p^3 + \frac{1}{4} \cdot \delta \cdot p^4 + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{1}{n} \cdot \kappa \cdot p^n + \frac{1}{n+1} \cdot \lambda \cdot p^{n+1} \right]_{p_1}^{p_2} \quad (27)$$

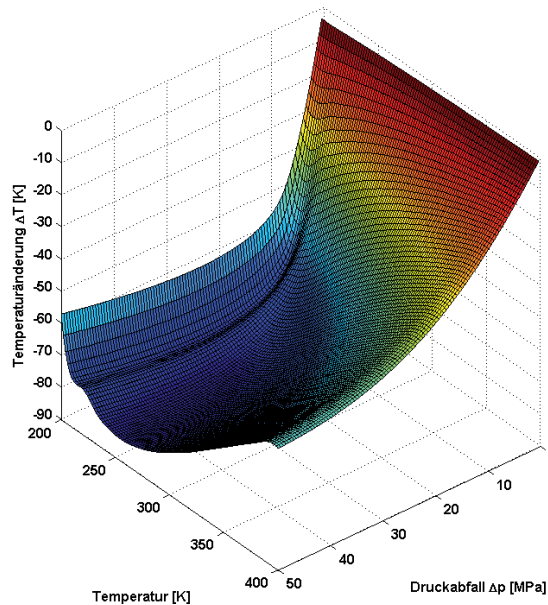


Bild 10\_ Darstellung des integralen Joule-Thomson-Effektes für Methan

In Bild 10 und Bild 11 sind die Kennfelder des integralen Joule-Thomson-Effektes für Methan und Wasserstoff für Druckbereiche von 0 bis 50 MPa bzw. 0 bis 70 MPa und 200 bis 400 K dargestellt. Interessant sind die Unterschiede im Verhalten der beiden Gase bei isenthalper Entspannung. Methan kühlt sich sehr stark ab (bis zu 85 K) und Wasserstoff erwärmt sich (bis zu 35 K).

Zur Veranschaulichung dieses Phänomens sind in Bild 12 die Inversionstemperaturen von Methan und Wasserstoff in einem Diagramm dargestellt. Eine isenthalpe Expansion

## Reales Gasverhalten – Molekulare Betrachtung

Reale Gase unterscheiden sich von idealen Gasen dadurch, dass die Wechselwirkung der Moleküle bzw. der Atome untereinander berücksichtigt werden muss. Das ist u.a. genau dann der Fall, wenn nicht mehr ein verdünntes Gas vorliegt, sondern ein stark komprimiertes Gas, bei dem die intermolekularen Abstände innerhalb der Reichweite der Bindungsradien der Teilchen liegen. Darüber hinaus sind die Gasmoleküle bzw. -atome keine Punktmassen, sondern besitzen endliche Volumina, die ebenfalls entsprechend berücksichtigt werden müssen. Bild A-1 veranschaulicht diese Zusammenhänge, allerdings in stark übertriebener Form.

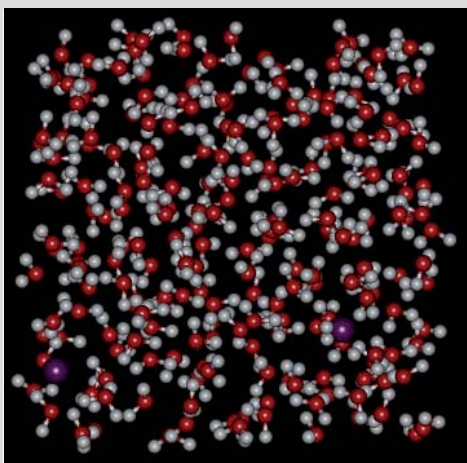


Bild A-1\_Stark komprimiertes Gas in einem abgeschlossenen Gasvolumen (Berücksichtigung von Wechselwirkungskräften und Eigenvolumen der Gasmoleküle)

Werden Technische Gase nun sehr stark komprimiert (Speicherdrücke über 300 bar oder höher), verhalten sich diese nicht mehr wie ideale Massenpunktgase nach den Regeln der kinetischen Gastheorie, sondern es liegt ein reales Gasverhalten vor, welches ausgeprägte

Wirkungen auf makroskopische Phänomene zeigt und bei der Systembetrachtung unbedingt berücksichtigt werden muss.

Die Modellvorstellung des realen Gases unterscheidet sich von der des idealen Massenpunktgases in zweierlei Hinsicht (Bild A-1):

\_Das Eigenvolumen der Moleküle verringert das frei verfügbare Volumen für die Moleküle um das sog. Kovolumen, das gleich dem vierfachen des Eigenvolumens der Moleküle entspricht, weil man die Verluste an Volumen in Rechnung stellen muss, die durch Stöße für den freien Impulsweg entstehen

\_Zwischen den Molekülen existieren abstandsabhängige Wechselwirkungskräfte

Diese intermolekularen Wechselwirkungskräfte können unter den vier existierenden Naturkräften der elektromagnetischen Wechselwirkung zugeordnet werden und sind elektrostatischer Natur. Die entscheidenden Kenntnisse der Eigenschaften eines makroskopischen Systems folgen aus der Kenntnis der intermolekularen Kräfte und aus dem thermischen Verhalten der Moleküle.

Die zwischenmolekularen Wechselwirkungskräfte (sog. Van-der-Waals-Kräfte) können näherungsweise durch das "Lennard-Jones-Potential" mit den Energie- und Längenskalen und beschrieben werden:

$$\phi(r) = 4 \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (A-1)$$

$\phi(r)$  Wechselwirkungsenergie zwischen zwei Gasmolekülen (Lennard-Jones-Potential)

$\sigma$  Moleküldurchmesser

$r$  Molekülabstand

$\varepsilon/k$  charakteristische/effektive Temperatur

$k$  Boltzmann-Konstante

Bild A-2 zeigt den charakteristischen Verlauf des Lennard-Jones-Potentials für die Wechselwirkung zweier Teilchen mit allen markanten

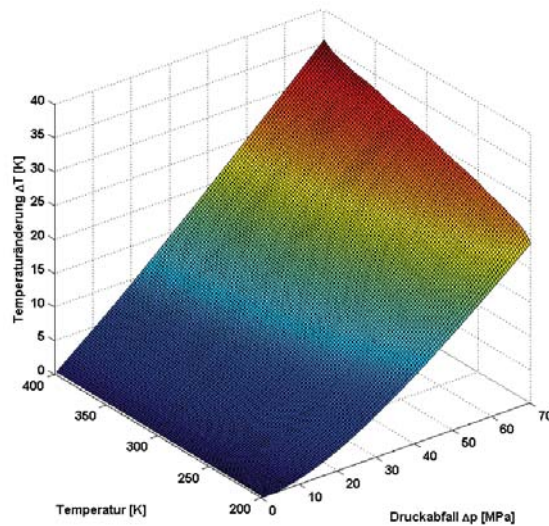


Bild 11\_ Darstellung des integralen Joule-Thomson-Effektes für Wasserstoff

innerhalb der Inversionskurve bedeutet eine Abkühlung des Gases und eine isenthalpe Expansion außerhalb der Inversionskurve eine Erwärmung. Bei den gegebenen Bedingungen (200 – 400 K und 0 – 50 MPa bzw. 0 – 70 MPa) ergibt sich für Methan größtenteils eine Abkühlung und für Wasserstoff eine Erwärmung.

Im vorliegenden Fall ist die starke Abkühlung des Methans bezüglich der Systemkomponenten innerhalb einer Gasversorgungseinheit aber deutlich kritischer einzustufen als die Erwärmung des Wasserstoffs.

Die Temperaturdifferenz nach der Expansion des Mediums ist aber in jedem Fall immer in Abhängigkeit zur Temperatur des Gases vor der Entspannung zu setzen. Bei Methan kann

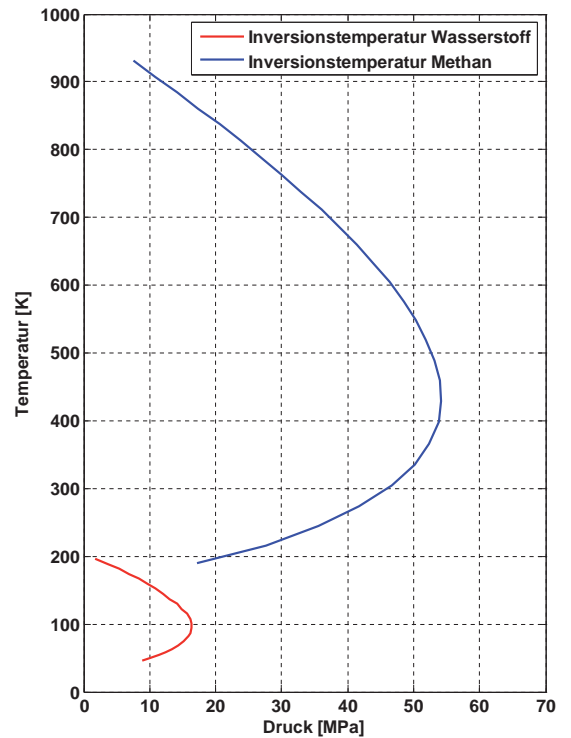


Bild 12\_ Darstellung der Inversionstemperatur von Methan und Wasserstoff

es, je nach Anfangsbedingung (Druck und Temperatur), und Druckabfall an der Drosselstelle zu extrem niedrigen Temperaturen und sogar zur Ausbildung einer Flüssigphase kommen. Bei Wasserstoff ergibt sich beispielsweise die größte Temperaturerhöhung bei einer Anfangstemperatur von 400 K, d.h. das Gas heizt sich bei Entspannung auf 435 – 440 K auf und kann in diesem Zustand bereits Komponenten (Dichtungen und Dichtpakete) schädigen.

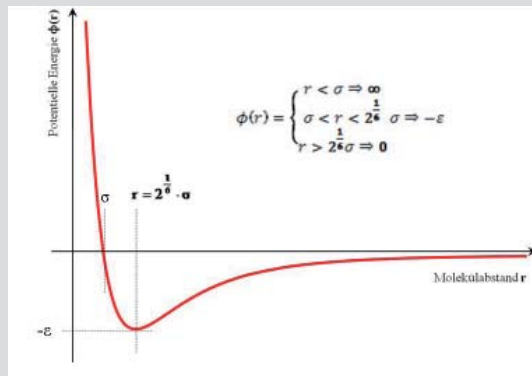


Bild A-2 Charakteristischer Verlauf des Lennard-Jones-Potentials für die Wechselwirkung zweier Teilchen

Merkmale der Potentiellen Energie als Funktion des Teilchenabstandes.

Der Verlauf des Lennard-Jones-Potentials nach Bild A-2 kann in drei wesentliche Bereiche untergliedert werden:

$$a) \quad \phi(r) \Rightarrow \lim_{r \rightarrow 0} \left[ 4 \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \right] = \infty \quad (A-2)$$

Für kleine Teilchenabstände  $r$  ist die Kraft  $F = -\nabla \cdot \phi$  stark repulsiv, denn es können sich nicht gleichzeitig zwei Teilchen an ein und demselben Ort befinden. Bei makroskopischer Betrachtung liegt der Realgasfaktor in diesem Fall über dem Wert von „1“.

$$b) \quad \phi(r) \Rightarrow \lim_{r \rightarrow 2^{1/6} \cdot \sigma} \left[ 4 \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \right] = -\varepsilon \quad (A-3)$$

Für Teilchenabstände, die der Längenskala  $r = 2^{1/6} \cdot \sigma$  und der Energieskala  $\phi(r) = -\varepsilon$  zustreben, erreicht die Wechselwirkung ein Maximum an Attraktion. Bei makroskopischer Betrachtung ist der Realgasfaktor hier kleiner „1“.

$$c) \quad \phi(r) \Rightarrow \lim_{r \rightarrow \infty} \left[ 4 \cdot \varepsilon \cdot \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \right] = 0 \quad (A-4)$$

Für große Teilchenabstände existiert kaum noch eine Wechselwirkung zwischen den Gasteilchen (stark verdünntes Gas, z.B. Luft unter atmosphärischem Druck). Die Potentielle Energie strebt asymptotisch einer stabilen Gleichgewichtslage und dem Energiewert Null zu, der Realgasfaktor liegt bei „1“, d.h. ideales Gasverhalten.

Die Kraftwirkung zwischen zwei Gasteilchen ergibt sich durch einfaches Ableiten von Gleichung (A-1):

$$F = -\frac{d\phi(r)}{dr} \quad (A-5)$$

Da sich die Gase allerdings frei im Raum bewegen können, sind zur mathematischen Beschreibung die entsprechenden Raumkoordinaten in x-, y- und z-Richtung zu beachten. Folglich gilt für die intermolekulare Kraftwirkung die Beziehung:

$$F = -\nabla \cdot \phi = \frac{\partial \phi}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial \phi}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial \phi}{\partial z} \vec{e}_z$$

$\nabla$  = Nabla-Operator (A-6)

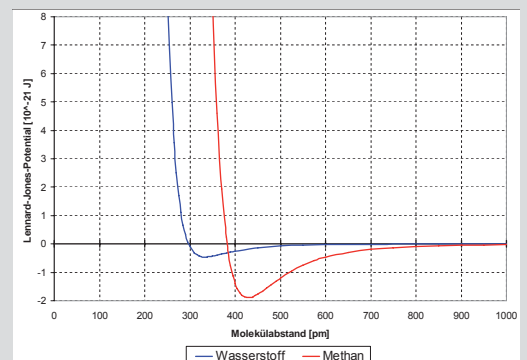


Bild A-3 Lennard-Jones-Potentiale für Wechselwirkung zwischen zwei Molekülen



## Zusammenfassung

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

Da bisher keine geeigneten Berechnungsmethoden existierten, die es erlaubten die Temperaturänderungen realer Gase bei isenthalper Zustandsänderung 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 isenthalper Zustandsänderung dient als Ausgangsbasis für die Gestaltung des richtigen Gasmanagementsystems, da ggf. große Temperaturschwankungen durch zusätzlichen gerätetechnischer Aufwand kompensiert werden müssen.

Es wurden exemplarisch Joule-Thomson-Koeffizienten und Temperaturänderungen für die beiden Gase Methan und Wasserstoff berechnet. Damit konnte veranschaulicht werden, wie groß die Temperaturschwankungen zum Teil sind und welche wechselseitigen Veränderungen sich bei unterschiedlichen Gasarten und Ausgangsbedingungen ergeben (starke Abkühlung von Methan und moderate Erwärmung von Wasserstoff).

## Ausblick

In der folgenden Ausgabe der Cahier Scientifique wird dann die isentrope Zustandsänderung und die abiatische Expansion sowie Kompression näher betrachtet. Die Abgrenzungen, Ergebnisse und Unterscheidungen beider wichtiger thermodynamischer Zustandsänderungen realer Gase werden anschließend anwendungsnah resümiert.

## 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

c	Strömungsgeschwindigkeit des Gases	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$C_p$	Wärmekapazität bei konstantem Druck	$[\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1}]$
g	Gravitationskonstante	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
h	spezifische Enthalpie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
H	Enthalpie	$[\text{J}]$
m	Masse	$[\text{kg}]$
n	Stoffmenge	$[\text{mol}]$
p	Druck	$[\text{Pa}], [\text{bar}]$
Q	Wärmestrom	$[\text{J}]$
$R_i$	spezifische Gaskonstante	$\left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
s	spezifische Entropie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
S	Entropie	$[\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$
T	Temperatur	$[\text{K}]$
u	spezifische innere Energie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
U	innere Energie	$[\text{J}]$
v	spezifisches Volumen	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
V	Volumen	$[\text{m}^3]$
W	Arbeit	$[\text{J}]$
Z	Realgasfaktor	$[-]$
$\mu_{JT}$	Joule-Thomson-Koeffizient	$[\text{K} \cdot \text{bar}^{-1}]$

Die Bilder A-3 und A-4 zeigen die Verläufe des Lennard-Jones-Potentials und die Kraftwirkung für die beiden Gase Wasserstoff und Methan.

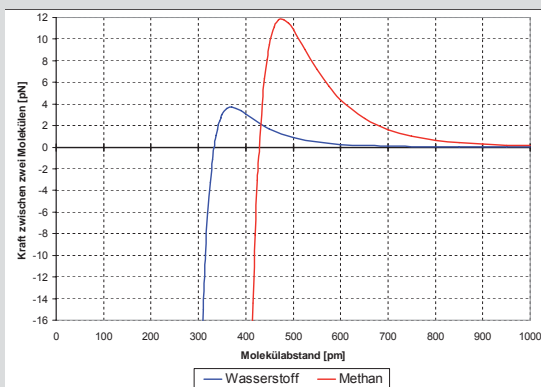


Bild A-4 Intermolekulare Kraftwirkung zwischen zwei Molekülen

Ein Minimum an potentieller Energie wird definitionsgemäß unter folgenden Bedingungen erreicht:

$$\frac{d\phi(r)}{dr} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \left[ 6 \cdot \frac{\sigma^6}{r^7} - 12 \cdot \frac{\sigma^{12}}{r^{13}} \right] = 0 \quad (\text{A-7})$$

$$\frac{d\phi^2(r)}{dr^2} = 4 \cdot \varepsilon \cdot \left[ 156 \cdot \frac{\sigma^{12}}{r^{14}} - 42 \cdot \frac{\sigma^6}{r^8} \right] > 0 \quad (\text{A-8})$$

Aus der obigen Gleichung (A-7) folgt, dass sich bei einem Molekül- abstand von:

$$r = 2^{\frac{1}{6}} \cdot \sigma \quad (\text{A-9})$$

ein Minimum an potentieller Energie einstellt. Daraus lassen sich für die Gase "Methan" und "Wasserstoff" die folgenden Zahlenwerte errechnen:

Methan:

$$\phi(r)_{\min} = -1,8906 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$r_{\min} = 428,8 \cdot 10^{-12} \text{ m} \quad (\text{A-10})$$

Wasserstoff:

$$\phi(r)_{\min} = -0,4595 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$r_{\min} = 333,4 \cdot 10^{-12} \text{ m} \quad (\text{A-11})$$

Da die anziehende Wechselwirkung bei Methan deutlich ausgeprägter ist als bei Wasserstoff, ist bei makroskopischer Betrachtung auch die von der Inversionskurve umschlossene Fläche bei Methan viel größer als bei Wasserstoff (vergleiche Bild 12). Dies hat entsprechende Auswirkung bei der isenthalpen Entspannung der beiden Gase Methan und Wasserstoff (Methan kühlt sich in einem relativen großen Druck- und Temperaturbereich ab, Wasserstoff hingegen lediglich in einem sehr kleinen Druck- und Temperaturbereich).

Auf dem feinen, von Wind und Wetter geglätteten Staub eines Feldweges ist die Schlängelung der soeben von Fahrrädern hinterlassenen Spuren nicht zu übersehen. Ohne diese gewundene Fahrweise wäre das Gleichgewicht eines Zweirades nicht zu halten. Gerät das Vorderrad in die Fahrrinne einer Trambahn, so sitzt die Lenkung fest und der sofortige Sturz ist unausweichlich. Die zum Erhalt des Gleichgewichts nötigen Lenkausschläge sind unabdingbar, jedoch so gering, dass das Geheimnis der aufrechten Haltung des Fahrrades durch bloßes Radeln nicht zu ergründen ist. Hierzu muss erst ein Funktionsmodell erstellt werden, dessen maßgebliche Parameter dementsprechend gemessen und ausgewertet werden können.

Zur Physik des Fahrrades

## DAS ZWEIRAD ALS FAHRENDES PENDEL\_

Ing. dipl. Henri Muller

### Gleichgewicht zwischen Fall- und Hebekräften

Die gegensätzlichen Kräfte sind einerseits die Schwerkraft, andererseits die Fliehkräfte, die der Radler mit einer jeweils geeigneten Kurvenfahrt zu erzeugen weiß. Eine Linkskurve hebt das nach links geneigte Fahrrad, eine Rechtskurve verhindert den Sturz nach rechts. Da der Gleichgewichtszustand des Rades grundsätzlich nur labil sein kann, führt seine unnatürliche, aufrechte Haltung zwangsläufig zu einer Pendelbewegung um den Gleichgewichtspunkt. Es handelt sich um ein in der Regeltechnik allgemein gültiges Gesetz: Jede Steuerung besteht aus einer unaufhörlichen Folge gegensätzlicher, sich kompensierender Übersteuerungen.

Die Stützlinie ist die die Auflagepunkte der beiden Räder enthaltende Gerade. Wir betrachten zum einen die „Längsebene“ des Systems, die den Schwerpunkt des Gesamtgewichts  $P$  kg (Fahrer + Rad) sowie die Stützlinie enthält, zum anderen die auf Längs- und Fahrebene senkrechte, den Schwerpunkt des Systems enthaltende „Querebene“. Bei der Pendelbewegung des Rades neigt sich die Längsebene gegenüber ihrer Gleichgewichtsstellung um den Winkel  $\alpha$  (s. Bild 1). In der Querebene beschreibt dabei der Schwerpunkt einen Kreisbogen, dessen Zentrum im Schnittpunkt von Längs-, Quer- und Fahrebene liegt. Der Radius des Kreisbogens ist gleich  $H$  (= „Höhenlage“ des Schwerpunkts), die Bogenlängen  $a$  der Pendelausschläge gehen von  $-a_0$  bis  $+a_0$  (im Gleichgewichtspunkt ist  $a = 0$ ).

In der Querebene entwickelt die Schwerkraft eine Fallkomponente (fall) abhängig vom Neigungswinkel  $\alpha$  ( $= a/H$  rad):  $\text{fall} = P \times g \times \sin(\alpha)$  N ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  = der irdischen Schwerkraft entsprechende Beschleunigung). Der Schwerkraft widersetzt sich die Hebekraft (heb). Das Trägheitsmoment  $I$  von Fahrer und Zweirad um die Stützlinie beträgt  $I \approx [P/(2 \times H)] \times h^2 \times dh$  (Integration von 0 bis  $2 \times H$ )  $= (4/3) \times H^2 \times P$ . Wir wollen, dass in jedem Augenblick die Aufrichtung des Fahrrads mit einer gegebenen Winkelbeschleunigung  $\beta$  geschieht. Die Hebekraft muss also um die Beschleunigungskraft  $\text{besch} = \text{Beschleunigungsmoment} / H = I \times \beta / H = (4/3) \times H \times P \times \beta$  N größer sein als die Fallkomponente:  $\text{heb} = \text{fall} + \text{besch} = P \times g \times \sin(\alpha) + P \times (4/3) \times H \times \beta$  N (1). Andererseits ist die Hebekraft eine Komponente der vermittelten der passenden Kurvenfahrt (mit Radius  $R$  und

Fahrgeschwindigkeit  $f$ ) erzeugten Fliehkraft ( $\text{flieh} = P \times f^2 / R$ ):  $\text{heb} = \text{flieh} \times \cos(\alpha) = [P \times f^2 / R] \times \cos(\alpha)$  N (2). Aus (1) und (2) folgt (3):  $R = f^2 \times \cos(\alpha) / [g \times \sin(\alpha) + (4/3) \times H \times \beta]$ .

### Vorgegebene Pendelgesetze

Bei (mittlerer) Geradeausfahrt werden der Pendelbewegung des Fahrrads folgende Eigenschaften unterstellt:

- \_sie ist symmetrisch
- \_sie wiederholt sich in regelmäßigen Zeitabständen (Periodendauer =  $Z$ )
- \_ihr kreisförmige Pendelausschlag schwankt zwischen  $-a_0$  und  $+a_0$  um den Gleichgewichtspunkt  $a = 0$
- \_an den Umkehrpunkten ( $a = -a_0$  und  $a = +a_0$ ) ist die Pendelgeschwindigkeit ( $v$ ) gleich Null
- \_dort ist die Beschleunigung ( $b$ ) maximal
- \_b verändert sich graduell, um im Gleichgewichtspunkt zu verschwinden ( $b = 0$  für  $a = 0$ )

Wir betrachten nun die folgenden von der Zeit ( $z$ ) abhängigen Pendelfunktionen (mit  $k = 2 \times \pi / Z$ ):

- \_Pendelausschläge:  $a(z) = a_0 \times \sin(k \times z)$  m
- \_Pendelgeschwindigkeiten:  
 $v(z) = da/dz = a_0 \times k \times \cos(k \times z)$  m/s
- \_Pendelbeschleunigungen:  
 $b(z) = dv/dz = -a_0 \times k^2 \times \sin(k \times z)$  m/s<sup>2</sup>

Diese Zeitfunktionen genügen Punkt für Punkt obiger Liste (s. Bild 2). Da die wirklichen Pendelbewegungen zurzeit nicht bekannt sind, werden wir diese Funktionen ohne Abstrich oder Zusatz als Arbeitshypothesen benutzen. In Formel (3):  $R = f^2 \times \cos(a/H) / [g \times \sin(a/H) + (4/3) \times H \times \beta]$  m ersetzen  $a(z)$  und  $b(z)$  die Veränderlichen  $a$  und  $\beta(z) = b(z)/H$ . Der Wegverlauf des Fahrrads ist mit der Zeitfunktion der Krümmungsradien  $R(z)$  eindeutig bestimmt und kann so rechnerisch detailgetreu nachgebildet werden (s. Bild 6).

Drehwinkel der Lenkstange (s. Bild 3):  $\varphi(z) = 2 \times \arcsin\{A / [2 \times R(z)]\}$  ( $A = 1 \text{ m} = \text{Radabstand}$ ).

### Kreiseffekte der Räder

Wenn wir einen Raddurchmesser von  $2 \times r = 0.70 \text{ m}$  annehmen und gedanklich das gesamte Gewicht ( $p = 2 \text{ kg}$ ) des

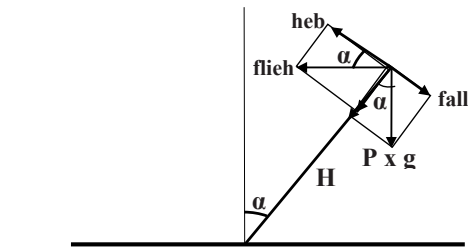


Bild 1

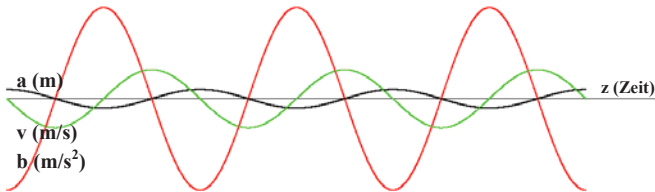


Bild 2

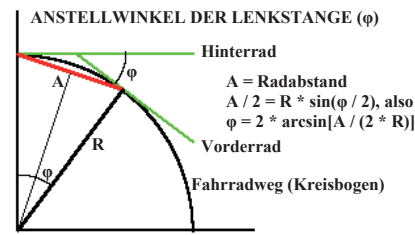


Bild 3

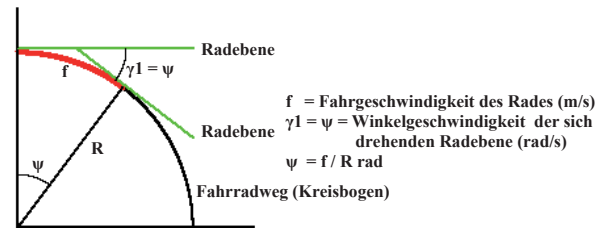


Bild 4

Rades in seinen Reifen verlegen, so ist das Trägheitsmoment  $TM = p \times r^2 = .245 \text{ kg} \times \text{m}^2$  eines jeden der beiden Räder sicherlich überbewertet.

Ein Kreiseffekt entsteht, wenn die das drehende Rad enthaltende Ebene selbst in Drehung gerät. Dieser Kreiseffekt verursacht ein Drehmoment (DM), dessen Achse innerhalb der Radebene senkrecht zur Achse der Zusatzdrehung steht. DM ist proportional dem Trägheitsmoment (TM) und der Winkelgeschwindigkeit ( $\omega$ ) des drehenden Rades, sowie der Winkelgeschwindigkeit ( $\gamma$ ) der drehenden Radebene:  $DM = TM \times \omega \times \gamma$  (bei einer Fahrt von  $f = 25 \text{ km/h} = 6.944 \text{ m/s}$  beträgt die Winkelgeschwindigkeit der Räder  $\omega = f/r = 19.84 \text{ rad/s}$ ).

1. Der zur Erhaltung des Gleichgewichts notwendigen Kurvenfahrt entspricht ein erster Kreiseffekt. Beim Durchfahren eines Kreisbogens von Radius R mit der Fahrgeschwindigkeit f dreht die Radebene mit der Winkelgeschwindigkeit  $\gamma 1 = f/R \text{ rad/s}$  (s. Bild 4). Der von den beiden Rädern erzeugte Drehmoment  $DM1 = 2 \times TM \times \omega \times \gamma 1$  Newtonmeter trachtet das Fahrrad aufzurichten. Im Schwerpunkt wirkt DM1 mit der Kraft:

$$\text{kreis1} = DM1/H = 2 \times (TM \times \omega \times f/R)/H = 2 \times p \times r \times f^2/(R \times H)$$

Die Hebekraft  $\text{heb} = P \times f^2/R / \cos(\alpha)$  kann sich dementsprechend beschränken auf

$$\text{heb}' = \text{heb} - \text{kreis1}$$

$$= P \times f^2/R / \cos(\alpha) - 2 \times p \times r \times f^2/(R \times H)$$

$$= [P \times f^2/R] / \cos(\alpha)$$

$$\times [1 - [2 \times p \times r \times f^2/(R \times H)] / [P \times f^2/R \cos(\alpha)]]$$

$$= [P \times f^2/R / \cos(\alpha)] \times (1 - u) \text{ mit } u$$

$$= 2 \times [(r \times p) / (H \times P)] / \cos(\alpha)$$

Mit  $p = 2 \text{ kg}$ ,  $r = 0.35 \text{ m}$ ,  $P = 15 \text{ kg}$  (Gewicht von Fahrrad + Gepäck) +  $75 \text{ kg}$  (Gewicht des Fahrers) =  $90 \text{ kg}$ ,  $H = 1.2 \text{ m}$  vermindert sich (unabhängig von  $a_0$ ,  $Z$ ,  $f$ ) die benötigte Hebekraft (sowie die entsprechende Fliehkraft) um  $u = 1.3 / \cos(\alpha) \%$  (minimal bei Neigung  $\alpha = 0$ :  $\cos(0) = 1$ ).

2. Die Pendelbewegungen des Fahrrads verändern ständig die Neigung ( $\alpha$ ) der Räder gegenüber der Fahrbahn

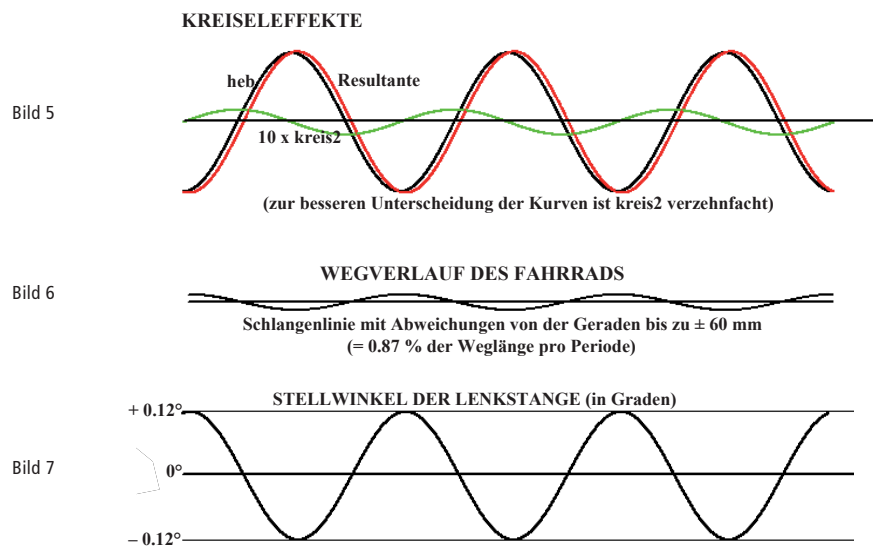
mit einer Geschwindigkeit  $\gamma 2 = d\alpha/dz = v/H = (a_0 \times k/H) \times \cos(k \times z) \text{ rad/s}$ . Die damit entstehenden Kreiseffekte haben das Bestreben, das Fahrrad um seine vertikale Achse zu drehen. Da dies nicht möglich ist, wirkt in diesem Falle ein Kompensationsmoment  $DM2 = 2 \times TM \times \omega \times \gamma 2$  mit der Kraft  $\text{kreis2} = DM2/H \text{ N}$  den Neigungsänderungen des Fahrrads entgegen. Laut Bild 5 erschwert die Phasenverschiebung zwischen Hebe- und Kreiselkräften die Erstellung des Gleichgewichts und führt zu (leicht) erhöhten Fliehkraften (um weniger als 0.01 %).

3. Durch die Neigung der Lenkachse in der Rahmenebene um den Winkel  $\theta$  gegenüber der Senkrechten zur Fahrbahn (z. B.  $\theta = 60^\circ$ ) bewirkt bei aufrecht stehendem Fahrrad jeder Lenkausschlag  $\phi$  ein seitliches Kippen des Vorderrads um den Winkel  $\mu = \arctan \{ \cos(\theta) \times \sin(\phi) / [\sin^2(\theta) \times \sin^2(\phi) + \cos^2(\phi)]^{1/2} \}$ . Die entsprechende Drehgeschwindigkeit  $\gamma 3 = d\mu/dz$  der Radebene ergibt sich aus dem Krümmungsradius R (Formel 3) und dem Ausdruck von  $\phi$ :  $\gamma 3 = A \times v \times \tan(\mu) \times [f^2 \times \tan(\alpha) / R + g - (4/3) \times k^2 \times H / \cos(\alpha)] / [H \times f^2 \times \tan(\phi) \times \cos(\phi/2)]$ . Dieser Kreiseffekt beschränkt sich auf das Vorderrad, ist verschwindend klein und hat ebenfalls den Makel der Phasenverschiebung.

Obige Ausführungen zeigen, wie eng die Kreiseffekte mit den Pendelbewegungen des Systems verknüpft sind. Entgegen einer weitverbreiteten Meinung sind sie gering und sogar zum Teil kontraproduktiv. Wenn auch die Kreiselkräfte eine Zunahme der Fahrradneigung erschweren, eine bestehende Schräglage können sie nicht beheben.

### Rechenergebnisse

Bild 6 entspricht zum Beispiel einer Fahrt von  $25 \text{ kmh}$ , einer Schwingungsperiode von  $Z = 3.5 \text{ s}$  und einem Maximalausschlag von  $a_0 = 2.5 \text{ cm}$ : Die Fahrradspur schlängelt sich mit Abweichungen von höchstens  $\pm 6 \text{ cm}$  um die mittlere gerade Wegstrecke von  $24.3 \text{ m}$  pro Periode (s. Bild 6). Der errechnete Verlauf stimmt leidlich überein mit den auf unserem staubigen Feldweg beobachteten Reifenabdrücken. Die Drehungen  $\phi$  der Lenkstange (s. Bild 7) bleiben unterhalb einer Winkelanstellung von  $\pm 0.12^\circ$  (= Krümmungsradien  $R > 497 \text{ m}$ ). Höhere Fahrgeschwindigkeiten verbessern fühlbar das Verhalten des Fahrrads: Die mit dem Quadrat



der Geschwindigkeit wachsenden Fliehkräfte vergrößern dementsprechend die Kurvenradien und verkleinern so die Verlaufskrümmungen und den Anstellwinkel. Umgekehrt machen sich bei langsamer Fahrt die Lenkausschläge zur Stabilisierung des Fahrzeugs deutlicher bemerkbar (s. weiter unten).

Primär dient die Lenkstange dazu, den vom Fahrweg vorgegebenen Kurven zu folgen. Im Falle einer Wegkrümmung mit Radius  $R_W$  stellt sich bei Fahrgeschwindigkeit  $f$  eine Gleichgewichtsneigung ( $\alpha_W$ ) ein, bei der die Fliehkraft ( $P \times f^2 / R_W$ )  $\times \cos(\alpha_W)$  der Schwerkraft  $P \times g \times \sin(\alpha_W)$  die Waage hält:  $\alpha_W = \arctan[f^2 / (R_W \times g)]$ . Die Werte  $R_W = 27.9$  m,  $f = 25$  km/h z. B. bedingen einen mittleren Neigungswinkel  $\alpha_W = 10^\circ$ . Da der so erreichte Gleichgewichtszustand ebenfalls labil ist, muss auch in den Wegkurven weiter gependelt werden. Der Wechsel von der mittleren Geradeausfahrt zur mittleren Kurvenfahrt wird ohne Zeitverlust mit einer kaum spürbaren Anpassung der Pendelbewegung eingeleitet. Die Lenkstange ist zugleich Lenkorgan und Neigungsregler. Diese Doppelrolle bleibt wegen der fließenden Übergänge und der Geringfügigkeit der Pendelausschläge unbemerkt, obwohl gerade sie dem Zweirad seine Wendigkeit verleiht. Sie vereinfacht die Handhabung des Zweirades in einem Ausmaß, das schließlich die zum Radeln nötigen Reflexe als natürlich empfinden lässt. Sie hat den Nachteil, das Erlernen des Radfahrens erheblich zu erschweren: Es gibt dazu weder Leitfaden noch Gebrauchsanweisung.

#### Obiger Darstellung zugrunde liegende Vereinfachungen

Die Neigung der Lenkachse und die geschwungene Form der Vordergabel verbessern spürbar die Fahrtauglichkeit des Rades. Dadurch aber wird die Kinematik des Zweirades viel komplizierter, als unsere bisherigen Überlegungen es voraussetzen. Diesbezügliche Berechnungen legen jedoch nahe, dass die Auswirkungen der vernachlässigten Bewegungsabläufe unsere mathematische Beschreibung der Pendelbewegung nicht grundlegend in Frage stellen.

#### Zu diesem Thema nur das Folgende

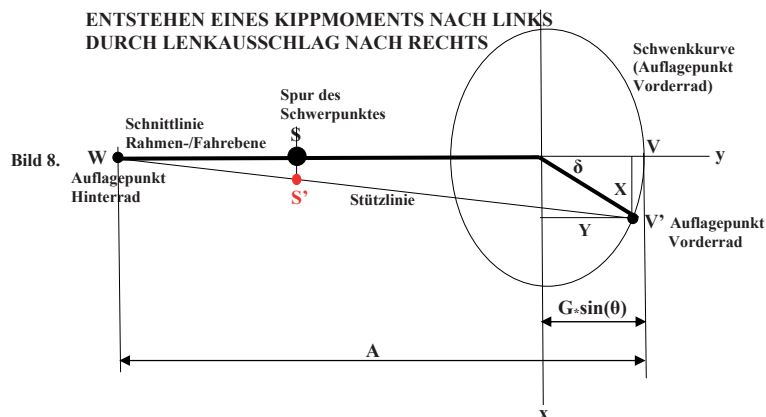
Die Projektion des Schwerpunktes auf die Fahrbene ist dessen „Spur“ (S) (s. Bild 8). Die „Rahmenebene“ enthält den Fahrradrahmen und die beiden Räder bei Nullstellung

der Lenkstange. Bei Lenkausschlag  $\varphi = 0$  und Neigung  $\alpha = 0$  des Fahrrads gegenüber der Fahrbahnebene fallen Spur und Stützlinie zusammen. Ein Abstand zwischen beiden entsteht, einerseits durch eine seitliche Neigung des Fahrrads, andererseits durch eine Drehung des Lenkrads. In der Tat, die Krümmung der Vordergabel lässt bei jedem Lenkausschlag Radachse und Auflagepunkt des Vorderrades aus der Rahmenebene ausscheren, wodurch der Abstand zwischen Schwerpunktskurve und Stützlinie sich entsprechend verändert. Ein Lenkausschlag nach rechts zum Beispiel verlagert die Stützlinie gegenüber der Spur in eben diese Richtung, vermindert also den Kippmoment nach rechts und hilft so der Fliehkraft beim Aufrichten des Fahrrades. Die dazu nötige Energie wird vom Radfahrer über die Lenkstange aufgebracht.

Bei Lenkausschlag  $\varphi = 0$  verschiebt der Kippwinkel  $\alpha$  die Spur von S nach S' und zwar um die Distanz  $U = H \times \sin(\alpha)$  ( $H$  = Höhenlage des Schwerpunktes). Die Gabelkrümmung lässt zwischen Lenk- und Vorderradachse einen Abstand  $G$  entstehen. Infolgedessen beschreibt die Radachse bei drehender Lenkstange einen Kreis, der Auflagepunkt V' des Vorderrades eine Ellipse. Hinsichtlich der gegenüber der Fahrbahn um  $(90 - \theta)^\circ$  geneigten Lenkachse und des Neigungswinkel  $\rho = \mu + \alpha \times \cos(\delta)$  des Vorderrades hat die Ellipse im Koordinatensystem (x, y) den Ausdruck:  $x = G \times \cos(\rho) \times \sin(\varphi)$ ,  $y = G \times \sin(\theta) \times \cos(\varphi)$ .  $\delta$  (= Drehung des Vorderrades gegenüber dem Rahmen für eine Drehung  $\varphi$  der Lenkstange) ergibt sich aus dem Gleichungssystem  $X(\delta)$ ,  $\delta = \arctan(X/Y)$ . Die S' enthaltende Stützlinie (mit Lenkausschlag  $\varphi_0$ ) muss die Bedingung  $X / [A - G \times \sin(\theta) + Y] = U / Q$  erfüllen ( $A$  = Radabstand bei  $\varphi = 0$ ,  $Q$  = Abstand WS). Erst bei  $\varphi > \varphi_0$  beginnt das Fahrrad sich aufzurichten, vorausgesetzt das Lenkrad jäh genug herumgerissen wird, um aufgrund des Beharrungsvermögens des Gefährts einer weiteren Lageänderung seines Schwerpunkts möglichst zuvorzukommen. Für  $A = 1$  m,  $G = 0.10$  m,  $H = 1.2$  m,  $Q = 0.30$  m,  $\theta = 60^\circ$  und einer Schiefelage von  $\alpha = 0.5^\circ$  beträgt der Mindestausschlag  $\varphi_0 = 20.74^\circ$ ; bei  $\alpha = 1^\circ$  müssen es schon  $47.50^\circ$  sein. Sollte allein die Verlagerung der Stützlinie das Gleichgewicht gewährleisten, so käme es zu sehr großen, ruckartigen Lenkausschlägen.



Bild 8



Das Radfahren wird ermöglicht durch zwei unterschiedliche, untrennbare, sich gegenseitig unterstützende Mechanismen, wobei allerdings die Fliehkräfte bei weitem überwiegen. Bei abnehmender Geschwindigkeit kommt die Vorderradversetzung mehr und mehr zum Zuge, um schließlich mangels Fliehkräften bei Stillstand und beim stationären Radeln auf Laufrollen die Gleichgewichtskontrolle eigenständig (gegebenenfalls mithilfe von Kreiseffekten) übernehmen zu müssen.

### Die Gleichgewichtsautomatik

Im Gegensatz zum Rahmenteil des Fahrrads ist sein Drehteil (Lenkstange nebst Zubehör, Gabel, Vorderrad) zusätzlich vier Kräften ausgesetzt. Der „Nachlauf“ des Vorderrads (Abstand zwischen Schnittpunkt verlängerte Lenkachse / Fahrebene und Auflagepunkt Vorderrad) versucht das Vorderrad auf die Rahmenebene auszurichten. Ebenso, in minderm Maße, die Gabelkrümmung (die übrigens den Nachlauf beschränkt): Sie bewirkt, dass der Schwerpunkt des Fahrrads für  $\varphi = 0^\circ$  seinen tiefsten Stand erreicht. Naturgemäß behindern die entsprechenden Kreiselkräfte des sich drehenden Vorderrads jedwede Bewegung der Lenkstange. Die vierte Kraft dagegen dreht die Lenkstange in Kipprichtung. Neigt sich das Fahrrad nach rechts zum Beispiel, so kippt wegen der Schräglage der Lenkachse das Drehteil kraft seines Eigengewichts (nach Überwindung des Reibungswiderstands in der Lenkachse) nach rechts (falls nötig bis zu  $\varphi = 90^\circ$ ). Gegen den Gewichtseffekt des Drehteils haben die drei ersten Kräfte keine Chance. Bei einem korrekt konstruierten Fahrrad bringt dieser Effekt selbsttätig die Lenkstange in die gebotene Richtung. Die unmittelbar einsetzenden Fliehkräfte richten Rahmen und Drehteil auf, die so ohne Verzug die Ausgangsstellung der nächstfolgenden Pendelphase erreichen. Die Erhaltung des Gleichgewichts wird zu einem automatischen Prozess (der selbst das freihändige Fahren erlaubt), zumindest auf einer halbwegs von Unebenheiten freien Fahrbahn. Das Zweirad ist letztlich ein selbstgesteuertes, kopfstehendes, energieaufwendiges, fahrendes Pendel. Der Fahrer liefert die Hebeenergie; die sich auf Kosten der Fahrgeschwindigkeit bildenden Fliehkräfte leisten die entsprechende Arbeit. Das eigentliche Hindernis beim Erlernen des Radfahrens sind die ursprünglichen Reflexe des Lehr-

lings. Solange diese ihn veranlassen sich der Automatik mit panischen, gegengerichteten Lenkausschlägen zu widersetzen, erfolgt Sturz auf Sturz.

### Experimentelle Überprüfung der Rechenergebnisse

Gemäß unseren theoretischen Überlegungen ist das Zweirad mit äußerst kleinen Pendelausschlägen zu beherrschen. Verwunderlich ist dies nicht, da es sich stets dicht beim Gleichgewichtspunkt einpendelt, möge dieser auch labil sein. Nur die Aufzeichnung laufend gemessener Pendel- und Lenkdaten bei gegebener Fahrtgeschwindigkeit kann Aufschluss geben über das wirkliche Verhalten des Rades.

Sind diese Parameter abhängig von den Eigenschaften des Fahrrads, von Gewicht, Geschick, Gehabe, Geschwindigkeit des Fahrers? Wird die Pendelperiode von Resonanzen beeinflusst? Würde man Fahrrad samt Fahrer kopfüber an den Rädern aufhängen, so entstünde ein Pendel: Gibt es einen Zusammenhang zwischen der Periode eines solchen Pendels und dem Schwingungsverhalten des Zweirads? Oder spielt die Eigenfrequenz des Drehteils eine Rolle? Es ist unwahrscheinlich, dass beim Radeln, ähnlich wie beim Gehen, die Armbewegungen (beim Bedienen des Lenkers) und die Beinbewegungen (beim Treten der Pedalen) sich gegenseitig beeinflussen. Letztlich hängt alles vom Gleichgewichtsorgan des Fahrers ab: Wie äußert sich die unvermeidliche Zeitverzögerung zwischen Wahrnehmung und Reaktion? Wie die Reibungskräfte in der Lenksäule? Auch auf ebener Fahrbahn benötigen die Hebephase der Pendelbewegungen Energie (die über die Pedalen geliefert wird): Könnte die Minimierung dieses Energiebedarfs einen Ansatz zur Berechnung der Schwingungsparameter hergeben?

Ing. dipl. Henri Muller

Jusqu'il y a peu, seuls les pays du sud étaient confrontés aux problèmes de pénurie d'eau mais depuis quelques années, ces derniers ont commencé à s'étendre aux régions du nord. En effet, l'équilibre précaire entre demande et disponibilité de l'eau a atteint dans de nombreux pays un point critique résultant d'une part d'une surexploitation des réserves et d'autre part de périodes de faible pluviométrie voire de sécheresse. La diminution du courant des rivières et du niveau des nappes phréatiques implique également celle de la qualité des eaux due à une dilution moins importante de la pollution (EEA, 2009).



## ANALYSE DES IMPACTS DE L'IMPLÉMENTATION DE LA DIRECTIVE CADRE SUR L'EAU SUR LES INDUSTRIES DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

# INDUSTRY WATER

Dr. Paul Schosseler, Dr. Denis Pittois, Ing. dipl. Alexandre Bertrand

En Europe, l'eau captée est principalement destinée aux quatre grands secteurs suivants: la production d'énergie 44% (dont l'usage principal est le refroidissement), l'agriculture 24%, la distribution publique 21% et l'industrie 11% (EEA, 2009). Au Grand-duché de Luxembourg, l'importance relative de l'eau à usage industriel, sans tenir compte de l'eau de refroidissement des centrales énergétiques, fut estimée en 1997 à 24,5 % de l'eau captée totale (ETC/IW1997 cité dans (EEA, 1999)).

Les industries manufacturières utilisent l'eau à diverses fins: nettoyage, chauffage, refroidissement, génération de vapeur, transport de substances, comme solvant ou comme partie intégrante du produit lui-même. Leur approvisionnement est assuré soit directement par le réseau de distribution public soit par leur propre système de pompage depuis le milieu environnant (rivière, source, forage...). Depuis une quinzaine d'années, la consommation d'eau par le secteur industriel a diminué due au déclin des industries lourdes nécessitant des quantités d'eau considérables (EEA, 2009).

### Directive Cadre sur l'Eau

En réponse aux problèmes présents et émergents concernant l'eau, le Parlement et le Conseil de l'Europe a adopté la Directive 2000/60/EC<sup>1</sup> (EC, 2000), fin 2000, qui allait établir une politique communautaire harmonisée concernant l'eau. Cette directive-cadre a pour but d'organiser la gestion de toutes les eaux intérieures afin « de prévenir et de réduire leur pollution, de promouvoir leur utilisation durable, de protéger leur environnement, d'améliorer l'état des écosystèmes aquatiques et d'atténuer les effets des inondations et des sécheresses. »

La mise en place de la directive cadre est répartie sur une période de 15 années, au terme desquels une bonne qualité des eaux devra être atteinte d'une part par la limitation ou la prévention d'émission de polluants, et plus particulièrement ceux listés comme substances prioritaires et d'autre part en protégeant, améliorant et restaurant cette qualité.

Pour inciter à une utilisation durable de cette ressource, les Etats Membres ont dû entre autre instaurer dès 2010 une tarification obligeant chaque secteur économique à participer aux coûts des services liés à l'utilisation de l'eau. Cette tarification devra également appliquer le principe pollueur-

payeur en liant le prix de l'eau à la quantité consommée et/ou à la pollution produite.

### Loi Luxembourgeoise

La transposition de la Directive Cadre sur l'Eau dans la législation luxembourgeoise (loi luxembourgeoise du 19 décembre 2008 (Mémorial, 2008)) implique des adaptations majeures de la politique actuelle sur l'eau au Grand-duché de Luxembourg en termes de gestion intégrée du Cycle de l'Eau au niveau des bassins hydrographiques. Cette transposition doit prendre en compte les besoins de tous les acteurs concernés afin d'atteindre pour 2015 une bonne qualité des eaux.

Une des étapes importantes de cette transposition est l'implémentation du principe pollueur (& utilisateur)-payeur qui peut susciter un intérêt particulier auprès des industries requérant pour leurs processus de grandes quantités d'eau ou émettant de grandes quantités de polluants. En effet la hausse des taxes sur l'eau de consommation et sur le traitement des eaux usées, engendrée par ce principe, a un impact financier sur ces industries depuis 2010.

La philosophie de la Directive Cadre sur l'Eau étant entre autre d'encourager les industries à réduire au maximum leur empreinte sur l'eau, traiter les eaux usées directement sur site, pourrait devenir économiquement plus avantageux pour celles raccordées au réseau public d'assainissement.

### Projet Industry Water

En partenariat avec l'Administration de la Gestion de l'Eau et la FEDIL (The Business Federation Luxembourg), le Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (CRTE), une structure commune du Centre de Recherche Public Henri Tudor et du Ministère du Développement Durable et des Infrastructures, a mené le projet Industry Water dont l'un des buts était d'apporter un support à différentes industries luxembourgeoises dans leur adaptation aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau.

### Méthodologie

Un diagnostic « eau » de six industries, issues de différents secteurs d'activités (sidérurgie, brasserie, production énergétique, fabrication verrière et de pneumatique), a été réalisé sur bases des informations récoltées lors de discussions,

Utilisations	Traitements	Notes concernant le traitement
Chasses d'eau et urinoirs	Déviations des 1 <sup>ères</sup> eaux	Pour éviter l'encrassement et le bouchage des tuyauteries
Réserve incendie	Déviations des 1 <sup>ères</sup> eaux	Colonnes montantes sèches pour éviter la contamination du réseau d'eau potable
Lavage sols et véhicules	Déviations des 1 <sup>ères</sup> eaux Désinfection par radiation UV ou chloration	Pour éviter des contaminations bactériologiques
Applications industrielles (eau de refroidissement...) : selon les spécificités requises par les processus	Déviations des 1 <sup>ères</sup> eaux Filtration (5-50 microns) Passage sur plaque de marbre Lait de chaux Charbon actif Désinfection (UV/chloration)	Si l'eau doit être minéralisée (diminution de l'agressivité)  Si l'eau doit être ramenée à un pH de 7  Si le carbone organique total doit être <2 mg l <sup>-1</sup>  Si la présence de bactéries gêne le procédé
Production d'eau déminéralisée		Sa faible minéralisation naturelle fait qu'elle permettra d'utiliser les résines échangeuses d'ions un plus grand nombre de cycles que dans le cas des eaux potables. Ces eaux doivent être exemptes de particules pour éviter tout bouchage mais également exemptes de métaux lourds (fer, cuivre, zinc...) pouvant contaminer les résines.

Tableau 1\_ Utilisations et traitements de l'eau de pluie (Helmreich et al., 2009; Kloss, 2008)

de visites de sites et par des données historiques. L'étude de bilan (différence entrée et sortie au niveau des processus et du site global) et l'analyse de flux de matière, permettant de détecter les importances relatives de chaque processus (consommation eau propre, rejet d'eau usée et de polluants) ont permis de détecter des points d'amélioration chez chacune d'entre elles.

Des recherches bibliographiques, menées dans les « Reference Document on Best Available Techniques (BREF)<sup>2</sup> », livres techniques et articles scientifiques, ont permis d'aboutir à des listes de recommandations visant à réduire la consommation en eau, le rejet en eaux usées ou en polluants.

Le paragraphe suivant présente différentes bonnes pratiques qui ont été recommandées ou observées dans les industries participantes et portant sur le choix des sources d'approvisionnement, sur les modifications des installations et enfin sur le traitement des effluents.

## Résultats

### L'eau de pluie comme source d'approvisionnement alternative

Selon les exigences des processus industriels, l'eau de pluie peut être envisagée comme source alternative d'approvisionnement. La récupération d'eaux de pluie à partir des toits des immeubles nécessite généralement peu de traitement (Apostolidis et al., 2006) et son utilisation permet une réduction de la demande en eau potable et par conséquent des coûts (la récolte et l'utilisation de l'eau de pluie étant non taxées au Grand-duché de Luxembourg contrairement aux eaux souterraines et de surface (0,10 €/m<sup>3</sup>)). Elle permet également une diminution des eaux de ruissellement vers le réseau d'assainissement unitaire et une amélioration de la qualité du traitement fourni par la station d'épuration.

Les principaux désavantages sont le coût initial des installations (citerne, systèmes de traitements, réseau séparé...) et les quantités irrégulières pouvant être récoltées dans le temps.

#### Qualité

Les eaux de pluies sont faiblement minéralisées et légèrement acides (pH 4-6). Elles sont généralement peu ou pas polluées, leur qualité dépendant avant tout de la présence de polluants atmosphériques issus de l'activité industrielle

et/ou du trafic routier avoisinants. A ceux-ci s'ajoutent les polluants issus des matériaux des toits eux-mêmes. Des toits en tuiles, ardoises ou plaques d'aluminium ne contaminent que très peu les eaux de pluie, alors que les toits en zinc, cuivre ou recouverts de peintures métalliques provoqueront une contamination importante des eaux par des métaux lourds (Helmreich et al., 2009) ou dans d'autres cas, d'hydrocarbures.

Le stockage des eaux de pluie se fait généralement dans des citernes construites dans un matériau sombre ou enterrées afin de prévenir la pénétration de la lumière et la croissance d'algues (Kloss, 2008).

Les eaux de pluies peuvent également charrier les feuilles d'arbres, le pollen et les fientes d'oiseaux présents sur les toits et les amener jusqu'à la citerne de stockage qui s'encrassera à la longue. Une des meilleures façons de se prévenir de l'accumulation de ses déchets est d'installer un système de déviation automatique permettant de dévier les premières eaux après une période sèche (first flush) et les débris qu'elles pourraient entraîner en dehors de la citerne.

#### Législation

La législation luxembourgeoise impose que le réseau d'eau de pluie soit complètement séparé du réseau d'eau potable afin de prévenir toute contamination.

#### Utilisations possibles et traitements ad-hoc

Le tableau 1 reprend une série d'exemples d'utilisation de l'eau de pluie et les traitements éventuellement nécessaires pour la purifier ou atteindre les critères requis par les processus.

#### Adaptation des installations

D'une manière générale, chaque entreprise a le potentiel de diminuer ses volumes d'eaux usées soit par le remplacement ou l'amélioration de ses processus ou en appliquant les principes de recyclage et de réutilisation des eaux de processus. Des économies peuvent cependant déjà être réalisées par un contrôle régulier des fuites et l'installation d'arrêts automatiques.

#### Rinçage à contre courant

Dans un système de rinçage à contre courant (cf. Figure 1), les pièces à nettoyer et l'eau propre circulent en sens oppo-

Système de refroidissement	Consommation moyenne d'eau [m³/h/MW <sub>th</sub> ]
Système à passage unique	86
Tour de refroidissement ouverte par voie humide	2
Tour de refroidissement ouverte (hybride) par voie humide/sèche	0.5
Tour de refroidissement par voie humide en circuit fermé	Variable
Tour de refroidissement par air sec en circuit fermé	0
Tour de refroidissement par voie sèche/humide en circuit fermé	1.5

Tableau 2\_ Consommation moyenne des différents systèmes de refroidissement

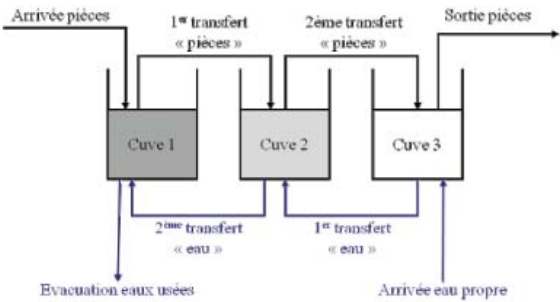


Figure 1\_ Principe du rinçage à contre-courant

sés. L'eau propre n'alimente que la dernière cuve de rinçage et déborde dans la cuve précédente et ainsi de suite jusqu'à remplir la première cuve. Par ce système, les pièces rencontrent toujours de l'eau plus propre que dans la cuve précédente. Ce procédé permet une économie d'eau de près de 40% par rapport au lavage traditionnel (Dworak et al., 2007).

Recyclage et réutilisation

Les principes de recyclage et de réutilisation des eaux de processus consistent à récupérer les eaux issues de ceux-ci et à les réinjecter dans les mêmes processus tant que leur qualité le permette (recyclage) ou, si leur qualité devient médiocre, à les réinjecter dans un autre processus où la qualité des eaux peut être moins élevée (réutilisation). L'avantage de ces deux principes est la minimisation à la fois des besoins en eau fraîche et des volumes d'émission d'eau usée (Degrémont, 2005a). Il est également possible d'améliorer les rendements de ces deux principes en optant pour un traitement direct des effluents à la sortie d'un processus. En effet, l'abattement directement sur site du ou des paramètres posant problème à l'aide de techniques compactes de traitement des eaux usées permettra de disposer d'une eau éventuellement apte à être recyclée ou réutilisée. Quelques traitements d'épuration sont brièvement présentés au paragraphe intitulé « Traitement des eaux usées ».

Optimisation des systèmes de refroidissement

Il y a encore quelques décennies, les systèmes de refroidissement étaient du type « à passage unique » où l'eau nécessaire au refroidissement est directement pompée depuis le milieu naturel puis y retourne à une température plus élevée. Ce type de système nécessite en moyenne près de 86 m³/h/MW<sub>th</sub> (EIPPC, 2001).

Depuis une à deux décennies, la consommation d'eau destinée à des fins de refroidissement a, en Europe, diminué en moyenne de près de 10 % grâce à l'installation de système de refroidissement plus avancé et nécessitant moins d'eau (cf. Tableau 2) (EEA, 2009). De plus, au Grand-duché de Luxembourg, l'Administration de l'Environnement prône à une fermeture des circuits de refroidissement.

Les paragraphes suivants présentent principe, avantages et inconvénients de systèmes plus avancés que le passage unique.

Récupération de chaleur

La meilleure possibilité d'empêcher ou du moins de limiter une partie des désavantages des systèmes de refroidissement est de récupérer la chaleur, par exemple à des fins de préchauffage de l'eau chaude sanitaire ou de procédés techniques.

Les avantages de la récupération de chaleur sont des frais fortement réduits liés à la consommation et au traitement des eaux de refroidissement et des coûts liés au chauffage ainsi substitué et des impacts sur l'environnement (toxicité des eaux, consommation en eau, émissions liés au chauffage, etc.) diminués grâce à une limitation de la consommation en énergie primaire (compensée par la chaleur récupérée) et des besoins en refroidissement.

Les désavantages de la récupération de chaleur sont principalement la complexité de la mise en œuvre et de l'utilisation de cette solution, car elle implique une gestion des sources et des puits de chaleur, qui sont, dans le pire des cas, décalés dans le temps. Un système de stockage de chaleur peut ainsi s'avérer nécessaire. L'installation des échangeurs de chaleur nécessite un certain investissement financier, et entraîne des activités additionnelles d'entretien pour éviter leur encrassement et ainsi une diminution de la performance énergétique du système. Finalement les échangeurs de chaleur ainsi que les conduites de distribution nécessitent une certaine surface pour leur emplacement.

Principe des tours de refroidissement ouvertes par voie humide

L'eau de refroidissement extrait et évacue la chaleur d'installations techniques pour être ensuite directement refroidie par les tours de refroidissement. L'échange de chaleur vers le milieu extérieur se fait par ruissellement de l'eau de refroidissement sur le corps interne de la tour, où une partie de l'eau est perdue par évaporation. L'eau recueillie dans le bac des tours s'est refroidie au contact de l'air et peut être ainsi réutilisée pour le refroidissement.

Afin d'éviter une surconcentration de sels liée à l'évaporation de l'eau et de garantir que les produits de traitement dans l'eau (produits anticorrosion, biocides, etc.) soient suffisamment actifs, l'eau de refroidissement doit être régulièrement purgée et remplacée. Ainsi, les tours de refroidissement entraînent une consommation constante en eau aussi



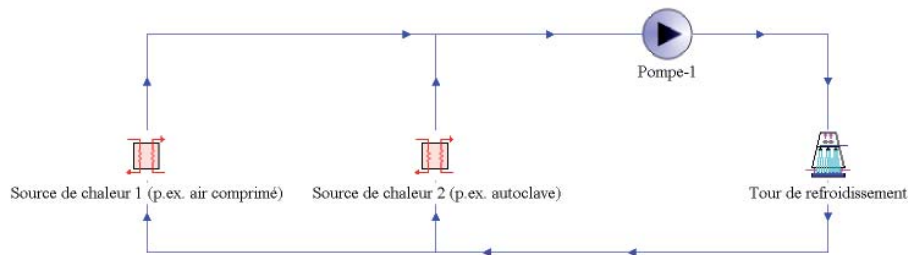


Figure 2\_ Représentation simplifiée du circuit de refroidissement ouvert par voie humide.

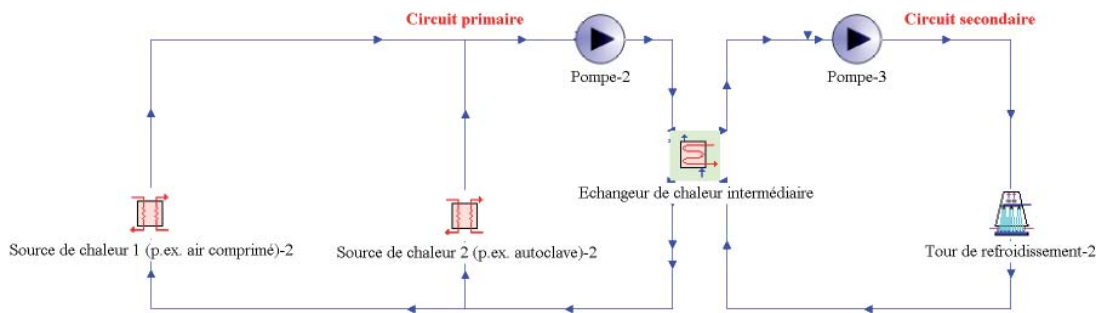


Figure 3\_ Echangeur de chaleur intermédiaire.

bien pour remplacer les eaux purgées que pour compenser les pertes par évaporation. Une représentation simplifiée d'un réseau de refroidissement ouvert par voie humide est donnée à la Figure 2.

Cette configuration présente certains avantages tels des coûts à l'investissement réduits, des interventions techniques relativement simples et peu coûteuses et une performance énergétique du système non dégradée par l'utilisation d'échangeurs de chaleur intermédiaires (cf. paragraphe concernant les tours de refroidissement ouvertes par voie humide avec échangeur de chaleur intermédiaire pour de plus amples détails).

Cette configuration présente cependant certains désavantages, tels d'importantes quantités et types différents de produits chimiques utilisés (la totalité de l'eau de refroidissement devant être traitée) et des volumes importants à purger et finalement des pertes importantes en eau en cas de fuite sur le réseau.

#### *Tour de refroidissement ouverte par voie humide avec échangeur de chaleur intermédiaire*

Certains des désavantages d'un système de refroidissement ouvert par voie humide peuvent être fortement restreints par l'installation d'un échangeur de chaleur intermédiaire (de type à plaque ou tubulaire), tel que représenté à la figure 3.

Dans le cas de cette configuration, l'eau de refroidissement (circuit primaire) extrayant la chaleur des différentes sources de chaleur verrait sa température diminuer non pas par l'entremise de la tour de refroidissement, mais plutôt par un échangeur de chaleur intermédiaire. Le circuit primaire serait ainsi un circuit fermé dont l'eau n'entrerait pas en contact avec l'air et ne s'évaporerait pas. La chaleur du circuit primaire serait transmise à l'eau du circuit secondaire, qui circulerait dans la tour de refroidissement selon le schéma actuel.

Les avantages de cette configuration sont:

- \_Une réduction du besoin en produits de traitement;
- \_Une réduction de la consommation en eau et des quantités de produits rejetés, le circuit primaire ne nécessitant pas par exemple de biocide;

\_Une maintenance simplifiée malgré l'entretien additionnel de l'échangeur de chaleur, car le réseau nécessitant la plus grande partie de ce genre d'intervention (i.e. le circuit secondaire) est fortement réduit;

\_Des pertes d'eau limitées en cas de fuites sur le circuit secondaire.

L'application de cette configuration entraîne, entre autres, plusieurs désavantages:

\_De par la perte de pression et la différence de température occasionnée par l'échangeur de chaleur, la consommation énergétique est plus élevée par rapport à la situation actuelle;

\_De plus, l'échangeur de chaleur doit être surveillé quant à sa performance concernant le transfert de chaleur, de manière à éviter une augmentation de la température de l'eau du circuit primaire liée à un encrassement excessif.

#### *Tour de refroidissement ouverte par voie humide/sèche (hybride)*

Une troisième possibilité permettant de diminuer la consommation en eau, en produits de traitement et en énergie sont de remplacer les tours de refroidissement classiques par des tours de refroidissement hybrides.

Le principe de base de ce concept reste le même que celui de l'échangeur intermédiaire, à savoir que l'eau de refroidissement extrayant la chaleur des procédés techniques n'entrerait plus au contact de l'air mais serait refroidie par un échangeur de chaleur. La différence avec le système de refroidissement ouvert par voie humide est que cet échangeur se situerait dans les tours de refroidissement, qui seraient de type hybride.

Les tours de refroidissement hybrides combinent les principes de fonctionnement des aérorefroidisseurs (systèmes de refroidissement secs par circulation d'air) et des tours de refroidissement mouillées (systèmes de refroidissement par ruissellement d'eau et circulation d'air). En période de basse température, les tours hybrides fonctionnent en mode sec, c'est-à-dire que l'eau du circuit primaire est refroidie indirectement par la circulation de l'air le long du corps d'échange, sans nécessiter de l'eau du circuit secondaire. La consommation en hiver en eau et en produits de

Procédés	Abattement principal	Abattement secondaire
Sédimentation et floculation (par sels de fer ou aluminium à pH 7-9)	Matières en suspension de densité supérieure à l'eau	Composés organo-halogénés adsorbables Demande biologique en oxygène Demande chimique en oxygène
Filtration : sur sable, filtre à précouche, sur diatomées	Matières en suspension	Demande biologique en oxygène Demande chimique en oxygène Phosphates insolubles Composés organo-halogénés adsorbables (si utilisation de diatomées mais pour concentrations faibles)
Filtration avec coagulation préalable	Matières en suspension Phosphates Couleur Turbidité	Demande biologique en oxygène Demande chimique en oxygène Matières colloïdales Composés organo-halogénés adsorbables (molécules de grande taille)
Charbon actif (grain/poudre)	Demande biologique en oxygène Demande chimique en oxygène Composés organo-halogénés adsorbables	Coloration Matière en suspension
Upflow anaerobic sludge blanket (UASB)	Demande chimique en oxygène	
Stripping ( <i>Air Stripping</i> )	Composés organo-halogénés adsorbables (molécules de petite taille)	

Tableau 3\_ Techniques de traitement d'eaux usées et paramètres traités.

traitement est ainsi nulle, les purges et les pertes par évaporation étant évitées. En période de température élevée, le corps d'échange est refroidi au contact de l'eau ruisselée, identique aux tours de refroidissement classiques. Certains constructeurs proposent de plus pour la période intermédiaire, où la température de l'air n'est plus suffisamment basse pour obtenir le niveau de température requis par le circuit primaire, de refroidir le flux d'air en y pulvérisant de l'eau (refroidissement adiabatique).

En plus des avantages de la configuration de l'échangeur intermédiaire suivant, il reste à mentionner que les consommations en eau et en produits de traitement ainsi que les purges sont optimisées.

Le principal désavantage est que les investissements pour des tours hybrides sont plus importants par rapport à une tour de refroidissement ouverte.

#### *Traitement des eaux de refroidissement*

L'emploi de l'eau dans les systèmes de refroidissement impose un traitement de celle-ci afin de réduire au maximum les problèmes liés à la corrosion, au dépôt de sel, à l'encrassement et à la contamination bactériologique.

Nous renvoyons le lecteur vers des ouvrages de références pour des techniques visant à inhiber les problèmes énoncés ci-dessus (Bertrand, 2004; EIPPC, 2001).

Toutefois, lors du choix et utilisation des produits de traitement, il faut veiller à:

- \_Opter pour des produits à toxicité la plus faible qui soit;
- \_Opter pour des produits rapidement biodégradable;
- \_Adapter le dosage des produits de traitement selon les besoins réels.

Ces quelques mesures permettent déjà de limiter l'impact environnemental des tours de refroidissement ainsi que l'impact sur la population microbienne des stations d'épuration auxquels les sites sont éventuellement raccordés.

#### **Traitement des eaux usées**

Le traitement des effluents industriels n'est pas toujours synonyme d'installation de stations d'épuration. Si dans certains cas, leur installation et utilisation est impérative, le

développement de techniques compactes de traitement des eaux usées a également permis l'abattement de paramètres spécifiques directement en sortie de processus et aussi d'accroître les possibilités de recyclage et de réutilisation.

Le tableau 3 résume brièvement quelques techniques communément rencontrées et les composés traités. L'objet principal de cet article n'étant pas le traitement des eaux usées, nous renvoyons le lecteur vers des ouvrages de références pour de plus amples informations (Degremont, 2005a, b; Eckenfelder, 1982).

#### **Bonnes pratiques concernant la consommation en eau**

Chaque secteur d'activité présentant ses propres spécificités en regard de l'eau, il est difficile de toutes les présenter en détails dans cet article. Toutefois il est possible de dégager quelques lignes directrices afin de minimiser le besoin en eau et réduire par là même l'empreinte environnementale liée. Une distinction entre sites en phase d'élaboration et sites existants est faite dans les deux paragraphes suivants.

##### *Sites en phase d'élaboration*

\_Dès la conception des bâtiments qui abriteront les installations, il est important de réaliser des recherches parmi les meilleures techniques disponibles afin de pouvoir opter pour des processus peu gourmands en eau et avec un faible rejet en eaux usées de qualité la meilleure qui soit. Il faut également y inclure les traitements compacts permettant l'abattement du ou des polluant(s). Si le traitement est directement assuré sur le site en sortie de processus, le potentiel de réutilisation s'en voit amélioré. Si plusieurs processus sont à prévoir, leur emplacement sur le site peut être commandé par le principe de recyclage des eaux.

\_En connaissant la consommation et exigences de chaque processus, il est possible de prévoir le potentiel d'utilisation de l'eau de pluie comme source primaire d'approvisionnement et de ne prendre les autres (eau potable, eau souterraine ou eau de rivière) que comme appoint. Si l'eau de pluie est une option, il faudra veiller à utiliser des matériaux de toiture inerte ne contaminant que très peu l'eau de pluie.

\_La contribution du site au ruissellement des eaux de pluie peut être diminuée en prévoyant des surfaces perméables

au niveau des parkings extérieurs en utilisant par exemple des blocs de béton à structures alvéolées remplies par du gravier. Pour les parties de surface devant être fermées, celle-ci peuvent être bordées par des zones de biorétention ou « Rain Gardens », celles-ci ayant la capacité de réduire à la fois le volume d'eaux de ruissellement et la charge polluante émis vers le réseau d'assainissement (Dietz et al., 2005).

Pour les industries ayant un besoin en eau inférieur à ce que peut leur fournir leur toiture, il est possible d'opter pour des toits verts permettant également de (Berndtsson, 2010):

- \_Diminuer le volume d'eau vers le réseau d'assainissement et le risque d'inondation.
- \_Améliorer la biodiversité et le paysage.
- \_Améliorer l'isolation phonique et thermique.
- \_Augmenter la durabilité des matériaux.
- \_Pour minimiser les besoins en eau au niveau des systèmes de refroidissement, une préférence sera donnée aux systèmes suivants, classés selon leur consommation croissante:
  - \_Récupération de chaleur;
  - \_Tour de refroidissement hybride;

#### Sites existants

Pour les sites déjà en place, plusieurs recommandations provenant du point précédent sont applicables et mais d'autres peuvent être faites pour diminuer la consommation d'eau potable et les impacts sur l'environnement y liés:

- \_Une liste des processus classés selon leur consommation permet de déterminer lesquels doivent être remplacés en premier lieu. Une recherche parmi les BREFS devrait permettre de trouver des possibilités de remplacement.
- \_La détermination de la composition des eaux usées de l'ensemble des processus permet de déterminer ceux où l'eau peut être réutilisée par le même processus ou recyclée vers un autre processus.
- \_La fermeture des circuits ouverts permet de diminuer leur consommation.

\_Le traitement des eaux de purges avant leur rejet et le contrôle de l'activité résiduelle des biocides permettent de s'assurer d'un faible impact sur la population microbienne des stations d'épuration et sur l'environnement.

Dr. Paul Schosseler

Dr. Denis Pittois

Ing. dipl. Alexandre Bertrand

1\_ ([http://europa.eu/legislation\\_summaries/agriculture/environment/l28002b\\_fr.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28002b_fr.htm))

2\_ Documents produits par l'European Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Bureau (visitez le site <http://eippcb.jrc.es/>)

#### Bibliographie

Apostolidis, N., Hutton, N., 2006, Integrated Water Management in brown-field sites — more opportunities than you think: Desalination, v. 188, p. 169-175.

Berndtsson, J.C., 2010, Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review: Ecological Engineering, v. 36, no. 4, p. 351-360.

Bertrand, A., 2004, Les impacts environnementaux des installations frigorifiques et les moyens pour y remédier, Les Guides de la Production Propre, Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement (CRTE).

Degrémont, 2005a, Mémento technique de l'eau (10 ed.), 2 v., v. 1.

2005b, Mémento technique de l'eau (10 ed.), 2 v., v. 2.

Dietz, M.E., Clausen, J.C., 2005, A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment: Water, Air, & Soil Pollution, v. 167, no. 1-4, p. 123-138.

Dworak, T., Berglund, M., Laaser, C., Strosser, P., Roussard, J., Grandmougin, B., Kossida, M., Kyriazopoulou, I., Berbel, J., Kolberg, S., Rodriguez-Diaz, J.A., Montesinos, P., 2007, EU Water Saving Potential: European Commission report ENV.D.2/ETU/2007/0001r.

EC, 2000, Directive 2000/60/EC du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Eckenfelder, W.W., 1982, Gestion des eaux usées urbaines et industrielles: caractérisation, techniques d'épuration, aspects économiques: Technique & documentation: Paris, Lavoisier.

EEA, 1999, Sustainable water use in Europe - Part 1: Sectoral use of water. 2009, Water resources across Europe - confronting water scarcity and drought.

EIPPC, 2001, Reference document on the application of best available techniques to industrial cooling systems.

Helmreich, B., Horn, H., 2009, Opportunities in rainwater harvesting: Desalination, v. 248, no. 1-3, p. 118-124.

Kloss, C., 2008, Rainwater Harvesting Policies: Municipal Handbook, U.S. EPA EPA-833-F-08-010.

Mémorial, 2008, Protection et Gestion des Eaux : Loi du 19 décembre 2008 relative à l'eau.

Es ist weitgehend unstrittig, dass die kleinen Hochwasserereignisse der Mosel zunehmend häufiger auftreten, d.h. es liegt hierfür der in Fachwelt und Öffentlichkeit oft diskutierte Verschärfungseffekt vor. Gründe sind die Flächennutzung des Einzugsgebiets (Versiegelung/Bebauung, Ackerbau etc.) sowie die Gewässerausbauten und sehr wahrscheinlich der Klimawandel. Für größere Hochwasserabflüsse ist dieser Effekt aber kaum noch nachweisbar und (wissenschaftlich) auch nur noch bedingt erklärbar.

# HOCHWASSERABFLÜSSE DER MOSEL

Prof. Dr.-Ing. Joachim Sartor

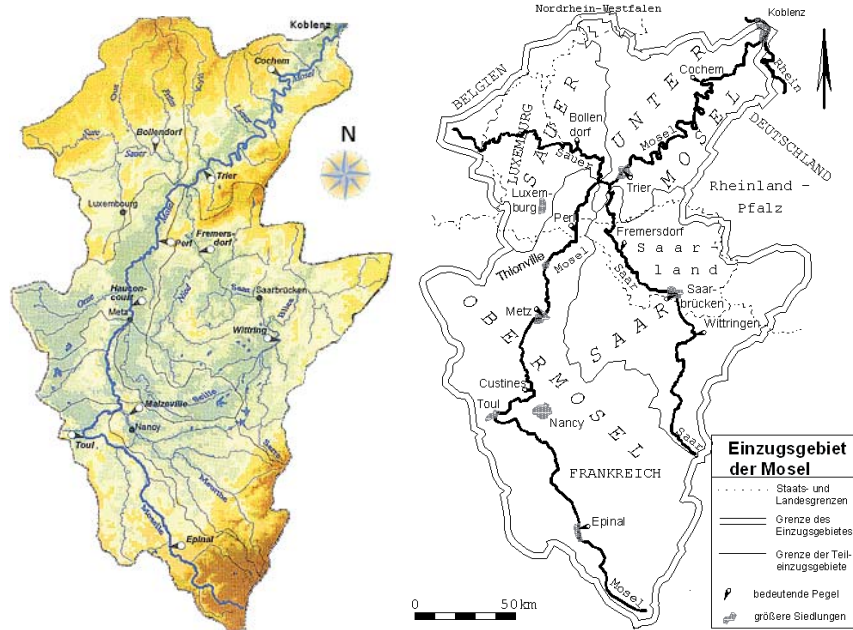


Bild 1. Übersicht zum Einzugsgebiet der Mosel (links: geographisch; rechts: hydrologisch und politisch)

## Einleitung und Aufgabenstellung

Dies gilt umso mehr für Extremereignisse, die sog. Jahrhunderthochwasser. Naturgemäß ist mit den amtlichen Pegelaufzeichnungen, welche Moselabflüsse von „nur“ ca. 100 Jahren umfassen, der Nachweis von eventuellen Veränderungen auf statistischem Weg nicht möglich. Falls vorhanden, ist ein solcher Verschärfungseffekt so gering, dass er auch jenseits der Nachweisgrenze von hydrologischen Ursache-Wirkungsanalysen (sog. deterministischen Verfahren) liegt.

Im Rahmen dieser Studie sollten deshalb mittels historischer Daten (Hochwassermarken an Gebäuden, Brücken etc.) die o.g. Pegelaufzeichnungen verlängert sowie mit einem relativ neuen Verfahren aus dem zugehörigen offiziellen Regelwerk in Form des Merkblatts 251 (DVWK 1999) entsprechende Hochwasserstatistiken aufgestellt werden. Durch diese Vorgehensweise wurden relativ konkrete Aussagen zu einem möglichen Verschärfungseffekt der Hochwasserabflüsse der Mosel erwartet. Ähnliche Untersuchungen

erfolgten bereits durch die Universitäten Cottbus und Leipzig für die Flussgebiete der Elbe und Oder (MUDELSEE ET AL 2003).

Die hier vorgenommenen Untersuchungen erfolgten in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz sowie einem ehemaligen Mitarbeiter der Wasserwirtschaftsverwaltung in Trier.

## Beschreibung des Einzugsgebiets

Die Mosel ist mit einer Einzugsgebietsgröße von 28.152 km<sup>2</sup> der größte Nebenfluss des Rheins. Sie entspringt in den Südvogesen. Auf ihrem ca. 520 km langen Lauf bis zur Mündung in Koblenz verliert sie rund 660 Meter an Höhe. Etwa zwei Drittel des Einzugsgebiets liegen außerhalb Deutschlands in Frankreich, Luxemburg und Belgien.

Hinsichtlich des knapp 200 km langen Moselabschnitts unterhalb von Trier (hydrologisch gesehen der Unterlauf, vgl. Bild 1) ist es für den Hochwasserablauf u.a. entscheidend, wie die Teilwellen aus Obermosel, Saar und Sauer zeitlich zusammentreffen. Letztmals dominierte der Abfluss aus der Obermosel bei den Hochwassern im April und Mai 1983. Diese waren die ersten größeren Ereignisse seit dem 1964 abgeschlossenen Ausbau zur Großschiffahrtsstraße bis Thionville bzw. seit der 1979 erfolgten Fertigstellung der 392 km langen Gesamtstrecke von Koblenz bis Neuves-Maisons (bei Toul). Die seither drei größten Ereignisse von 1993, 1995 und 2003 waren weitgehend vom zeitgleichen Zusammentreffen der Wellenscheitel aus Sauer und Saar geprägt.

Im Gegensatz zu Elbe, Oder und Rhein ist im Moseleinzugsgebiet kein nennenswerter Retentionsraum durch großflächige Eindeichungen verloren gegangen. Im Tal der Untermosel ist ein solcher auf Grund der spezifischen Morphologie ohnehin kaum vorhanden. Nach (BUSCH ET AL 1996) ist auch eine Hochwasserregelung durch den Bau von Rückhaltebecken oder gesteuerten Poldern bei großen Ereignissen nur sehr begrenzt möglich (max. Spiegelabsenkung ca. 1 Dezimeter). Noch geringer ist gemäß (BUSCH ET AL 2007) das Regelungspotential der Stauhaltungen.

## Vorgehensweise

Offizielle Pegelaufzeichnungen der Moselwasserstände begannen am 28.04.1817 in Cochem und am 01.09.1817



in Trier. Die BfG verwendet Scheitelabflüsse ab 1901 für die amtliche Hochwasserstatistik, wie sie z.T. in den sog. Gewässerkundlichen Jahrbüchern wiedergegeben wird. Hinsichtlich Pegeldata wurde im Rahmen dieser Untersuchung nur auf die weitgehend gesicherten und relativ konsistenten Werte von Cochem zurückgegriffen, da in Trier zwischenzeitlich der Pegelstandort wechselte, sich die Gerinnehydraulik ausbaubedingt änderte und größere Datenlücken vorhanden sind. Da die Pegelaufzeichnungen zwischen den Abflussjahren 1818 und 1900 offiziell nur als Wasserstände vorliegen, waren sie für die hier vorgelegte Untersuchung zunächst in Abflüsse umzuwandeln.

Zur Erfassung noch älterer Wasserstände wurde überwiegend auf historische Hochwassermarken zurückgegriffen, wie sie entlang der Mosel relativ zahlreich an Gebäuden, Brücken o.ä. zu finden sind. Im Rahmen von (STEINERT&STINNER 1994, BOHR& STRAUB 1996, MANGEN&THIEL 2008) wurden alle den Verfassern bekannte Marken zwischen Schengen (im Dreiländereck Deutschland, Frankreich, Luxemburg) und Cochem höhenmäßig aufgemessen und u.a. zur Plausibilitätsprüfung als Längsschnitte aufgetragen. Marken zu Ereignissen aus der Zeit vor 1784, die zudem das Hochwasser vom April 1883 übertrafen, fanden sich allerdings nur an der unteren Mosel ab Brauneberg. Die wahrscheinlich älteste Marke dieser Art befindet sich an der Kirche von Zell-Merl und stammt von 1534<sup>1</sup>. Ihre Höhe weist auf ein damaliges Ereignis in der Größenordnung des Januarhochwassers von 1995 hin.

Zur Absicherung und Ergänzung von historischen Hochwasserlängsschnitten konnte auch auf Angaben der ehemaligen Wasserstraßendirektion Koblenz von 1940 zu heute nicht mehr existierenden Marken zurückgegriffen werden sowie zwei Wasserstandshöhen an Hand detaillierter historischer Berichte rekonstruiert werden (REITZ 1932; WOLPERT 1980).

Insgesamt konnten so über 900 Hochwassermarken und rekonstruierte Wasserstandshöhen in die Untersuchung einbezogen werden.

Da für statistische Analysen üblicherweise Abflüsse verwendet werden (Wasserstände sind ortsabhängig und ändern



sich u.a. mit dem Gewässerprofil) wurde zur Umwandlung der Pegelwasserstände vor 1901 sowie von historischen Wasserständen in Abflüsse eine sog. Abflusskurve für den Pegel Cochem verwendet. Hierbei handelt es sich um die aktuell gültige Abflusskurve, die durch die BfG graphisch geringfügig extrapoliert worden ist (Bild 3). Die hydraulischen Randbedingungen haben sich in dem relativ engen Moseltal für Hochwasserabflüsse über die letzten Jahrhunderte nicht nennenswert geändert (BUSCH ET AL 2007). Zudem lieferten die Ergebnisse von Wasserspiegellagenberechnungen (Kap. 4) zu den historischen Ereignissen eine indirekte Bestätigung der Abflusskurve, aus der die zugehörigen Abflüsse entnommen wurden. Nach dieser Kurve entsprach z.B. der am Pegelhäuschen vermarkte „Jahrtausendwasserstand“ von  $W = 1218$  cm vom 28.02.1784 einem Durchfluss von ca.  $Q = 5750$  m<sup>3</sup>/s (Bild 3). Zum Vergleich betrugen die entsprechenden Werte des „Jahrhunderthochwassers“ vom Dezember 1993  $W = 1034$  cm und  $Q = 4170$  m<sup>3</sup>/s.

Bild 2\_Messtechnische Rekonstruktion des Hochwasserstandes von 1740 in der Kapelle von Ediger

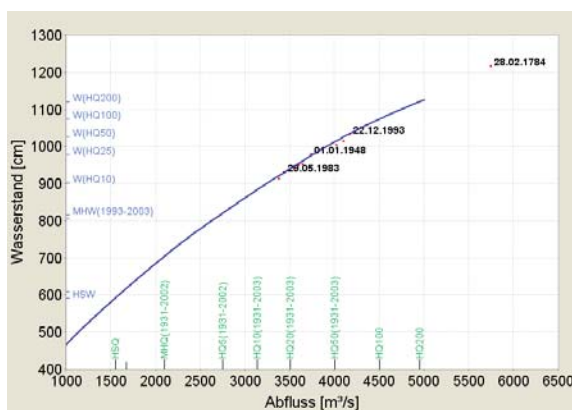


Bild 3\_Abflusskurve für den Pegel Cochem mit großen Hochwasserereignissen sowie offiziellen Haupt- und Extremwerten des Abflusses und des Wasserstands

Eine weitere Plausibilitätsprüfung der Daten erfolgte an Hand der Wasserspiegelquerneigung beim Ereignis von 1784. Für die relativ enge Krümmung (Radius ca. 1 km) bei Traben-Trarbach weisen Hochwassermarken einen Unterschied von 25 cm zwischen Außen- und Innenufer auf. Mit dem o.g. Durchfluss ergibt sich mittels dem Ansatz aus (PRESS&SCHRÖDER, 1966) eine erstaunlich gute (fast cm-genaue) Übereinstimmung zwischen gerechnetem und gemessenem Wert.

### Beschreibung historischer Extremereignisse und Datenplausibilisierung

Zur Erläuterung der Datenlage wird im Folgenden ein kurzer Überblick zu den großen Ereignissen von 1226, 1342, 1572/73, 1651, 1740 und 1784 gegeben, die vor Beginn der offiziellen Pegelaufzeichnungen aufgetreten sind. Zwecks Plausibilitätsprüfung werden u.a. Berichte zur Hochwassergeschichte herangezogen. Neben der in der Fachliteratur häufig zitierten Quellensammlung zur Witterungsgeschichte von (WEIKINN 2000) finden sich viele derartige Berichte auch in lokalen und regionalen Chroniken.

Hinsichtlich älterer, relativ ausführlicher Belege sei zunächst auf den Bericht Trierer Mönche (WYTTEBACH&MÜLLER 1839) zum Jahr 1226 verwiesen: „Im folgenden Jahre überschwemmte Wasser Trier, und die Mosel stieg über

Triers Mauern am Moselufer, und zwar so, dass die miten in der Stadt gelegenen Keller sich mit Wasser füllten, was bisher niemals seit den ältesten Tagen gesehen worden war.“ Im Juli 1342 fand das „Jahrtausendhochwasser“ des Rheins statt, bei dem das Wasser im Mainzer Dom einem Mann bis „zum Gürtel“ gestanden haben soll. (WYTTEBACH&MÜLLER 1839) erwähnen dieses Ereignis wie folgt: „Darauf gab es an der Vigil vor Jakobi (24. Juli 1342) eine gewaltige Überschwemmung im gesamten Rheintal, die aber nicht vom Rhein, sondern vom Main - ganz gegen die Natur - zur Heimsuchung [der Menschen] verursacht worden ist, so das man bisher unversehrte Häuser zerstört und von den Fluten fortgeschwemmt sah.“ Beispielsweise überragt am Eisernen Steg in Frankfurt/Main die Hochwassermarken dieses Ereignisses alle anderen Marken bei weitem (über 1,6 m höher als 1784) und stellt damit einen eindrucksvollen Beleg für die Ausmaße dieser Katastrophe dar. Ähnliches findet sich u.a. auch in Limburg/Lahn. Leider sind den Verfassern keine Anhaltspunkte bekannt, aus denen auf Hochwasserstände der Mosel vom Sommer 1342 geschlossen werden könnte. Es gibt allerdings Hinweise (WESTERMANN 1993), dass zu dieser Zeit im Bereich des heutigen Schutzhafens Traben-Trarbach eine Halbinsel aus Sedimentablagerungen entstand (sog. Werth), wie sie mehrfach im betrachteten Moselabschnitt zu finden ist. Dies wäre insofern plausibel, da bei diesem auch als „Magdalenenhochwasser“ bekannten Ereignis nach (BORK ET AL 1998) zumindest in Mitteldeutschland mehr Boden-erosion stattfand, als im verbleibenden Zeitraum zwischen 650 n.Chr. und 1990 zusammengekommen und von (SI-ROCKO 2009) in einem Eifelmaar eine entsprechend starke Schlammschicht aus dem Juli 1342 nachgewiesen wurde. Wegen fehlender Wasserstandsangaben konnten die Ereignisse von 1226 und 1342 nicht in die nachfolgenden Untersuchungen mit einbezogen werden.

Das älteste, einigermaßen mit Zahlen belegbare Extremereignis der deutschen Mosel fand im Winter 1572/73 statt. Dazu zitiert (KRAMES 1992): „Reben im Winter und Frühjahr erfroren, Hochwasser im Januar“. Hochwassermarken finden sich hierzu in der Kirche St. Michael in Bernkastel, an einem Haus in Kinheim sowie an der Kirche in Merl (Bild

4). Im Mittel liegen diese Marken um ca. 30 cm über den Hochwasserständen von 1993. Auch wenn die in Sandstein gemeißelten Schriftzüge und Markierungen der beiden Kirchen sehr vertrauenswürdig sind, so ist die Übertragung des Wasserspiegelverlaufs bis zum relativ weit entfernten Pegelstandort Cochem mit großen Unsicherheiten behaftet. Daher wurde dieses Ereignis bei der nachfolgend beschriebenen statistischen Analyse nach (DVWK 1999) in Form zweier Varianten berücksichtigt, um die mögliche Bandbreite des Ergebnisses aufzuzeigen. Zum einen wurde dazu vereinfachend der Pegelwasserstand mit demjenigen von 1993 gleich gesetzt und zum anderen um die besagten rund 30 cm höher angesetzt ( $W = 1060$  cm am Pegel Cochem). Aus der letztgenannten Annahme ergibt sich mittels Bild 3 ein Durchfluss von ca.  $Q = 4400$  m<sup>3</sup>/s, der durch Wasserspiegellagenberechnungen auf Plausibilität geprüft wurde (Bild 5).



Bild 4\_Hochwassermarken zum Ereignis von 1572/73 am hinteren Portal der Kirche in Zell-Merl

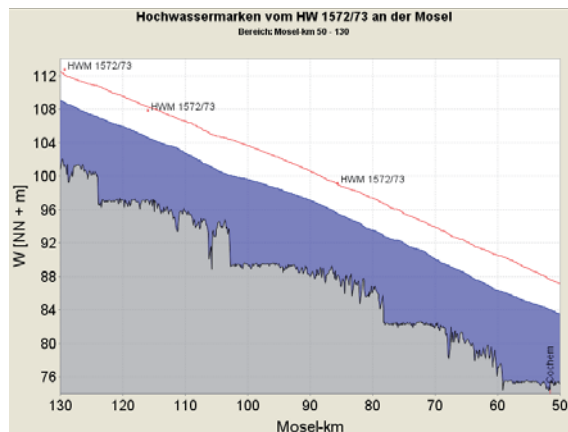


Bild 5\_Wasserspiegellagenberechnung zum Ereignis von 1572/73 ( $Q = 4400$  m<sup>3</sup>/s); zum Vergleich ist der mittlere Jahreshöchstwasserstand und der Sohlverlauf mit dargestellt

Zur Rekonstruktion des Hochwasserspiegelverlaufs von 1651 (der zweithöchste nach 1784) wurden im Rahmen von (STEINERT&STINNER 1994, BOHR&STRAUB 1996) zahlreiche Marken eingemessen, womit zumindest streckenweise ein plausibler Längsschnitt erstellt werden konnte. Damit lässt sich für den Pegelstandort Cochem ein Wasserstand von rund 1080 cm ableiten, dem gemäß Bild 3 ein Durchfluss von mindestens  $Q = 4500$  m<sup>3</sup>/s zugeordnet werden kann. In (REITZ 1932) wird dazu auf einen historischen Bericht verwiesen, in dem von einer so gewaltigen Überschwemmung die Rede ist, dass sie mit derjenigen von 1784 vergleichbar ist. Die Mosel soll danach 1651 in Ernst auf dem Altar der Pfarrkirche gestanden haben.

Für das Ereignis von 1740 lässt sich ähnlich wie für das Hochwasser von 1651 der Wasserspiegelverlauf streckenweise mit einiger Sicherheit rekonstruieren. Er lag danach bereichsweise sowohl etwas oberhalb wie auch etwas unterhalb von demjenigen des Jahres 1993. Für die weitere Analyse wurden die Spiegellagen von 1740 und 1993 vereinfachend gleichgesetzt. In (KREMER 1965) wird dazu eine zeitgenössische Schilderung der Zustände in Trier zitiert: „... Nach dieser Kälte ist im Advent eine große Nässe eingefallen, dass durch die langwährenden Regen das Wasser so groß gewachsen ist, dass alles Flurland überschwemmt

Zeitspanne [Abflussjahre]	Scheitelwasserstände [cm]				Summe
	680 - 779	780 - 879	880 - 979	≥ 980	
1818 - 1847 (1828 - 1857)	13 (14)	3 (5)	4 (2)	1 (2)	21 (23)
1848 - 1877 (1858 - 1887)	13 (9)	5 (6)	- (1)	1 -	19 (16)
1878 - 1907 (1888 - 1917)	7 (12)	3 (1)	1 -	- -	11 (13)
1908 - 1937 (1918 - 1947)	10 (11)	4 (5)	2 (2)	2 (2)	18 (20)
1938 - 1967 (1948 - 1977)	11 (7)	7 (9)	3 (3)	- -	21 (19)
1968 - 1997 (1978 - 2007)	13 (19)	12 (10)	3 (4)	1 (1)	29 (34)
1958 - 1967	3	3	1	-	7
1968 - 1977	2	4	-	-	6
1978 - 1987	8	4	2	-	14
1988 - 1997	3	4	1	1	9
1998 - 2007	8	2	1	-	11

Tab. 1 Anzahl und Größenordnung der Hochwasser der letzten 190 Jahre in 30 Jahres-Intervallen sowie der letzten 50 Jahre in 10 Jahres-Intervallen am Pegel Cochem. Die 30 Jahres-Intervalle ohne Klammern decken den Zeitraum von 1818 bis 1997 ab, diejenigen in Klammern den Zeitraum von 1828 bis 2007.

war. Zu Barbeln und im Krahnen sind die Leut zu den oberen Fenstern auf den Nachen ein- und ausgefahren, und fast in allen Kellern der ganzen Stadt war Wasser und hat das Hohe Wasser gewährt bis in den März des Jahres 1741.“ Die beschriebene Hochwasserlage „im Krahnen“ (heute Krahnenstraße) weist auf einen Wasserspiegel über demjenigen von 1993 hin.

Zumindest alle seit dem Mittelalter beobachteten Moselhochwasser wurden von der Katastrophe vom Februar 1784 weit übertroffen. Den ausführlichsten Bericht darüber hat der Trierer Privatgelehrte L. Müller (MÜLLER 1813) verfasst, in dem es u.a. heißt: „Einen solchen Winter, wie jener des 1784 Jahres erlebt zu haben, wissen die ältesten Leut sich nicht zu erinnern. Er drohte vielen Tausend Menschen mit dem schreckbarsten Tod, der sicher erfolgt, wenn nicht Wunder dazwischen gekommen wärn. Indessen haben doch sehr viele ihre Leben müssen hergeben, theils wegen Schnee, theils wegen Kält, theils wegen Eis und großem Gewässer.“ Nach seinen weiteren Aufzeichnungen brach das Eis der in den vorangegangenen Monaten mehrfach zugefrorenen Mosel am 23.2. um 19 Uhr, während der Hochwasserscheitel am 28.2. zwischen 12 und 13 Uhr erreicht wurde. Dies ist deshalb erwähnenswert, da dieser extreme Scheitelwasserstand oftmals auf Eisstau zurückgeführt wird. Dagegen spricht zum einen der genannte große zeitliche Abstand zwischen dem Aufbrechen der Eisdecke auf Grund der anlaufenden Hochwasserwelle und dem Wellenscheitel. Zum anderen weisen weder ein aus (ZENTRALBUREAU FÜR METEOROLOGIE UND HYDROLOGIE 1905) stammender historischer noch die im Rahmen von (STEINERT&STINNER 1994, BOHR&STRAUB 1996) angefertigten Längsschnitte (der Maximalwasserstände) nennenswerte Unstetigkeiten bzw. Sprünge auf. Dennoch traten gemäß zeitgenössischen Berichten lokale Eisstaus in einigen der engen Moselkrümmungen auf, wo sich abtreibende Eisschollen verkeilten. Hierdurch kam es dann wohl zu rasanten Wasserspiegelanstiegen mit sturzflutartigen Überschwemmungen. Berichten zu Folge (SCHMITZ 1995) konnte sich z.B. ein Schäfer im Moselvorland bei Müden davor gerade noch auf einen Baum retten und seinen Hund hinter herziehen, während seine Schafe ertranken. Dies alles ist wahrscheinlich losgelöst von dem erst vier Tage

später eintretenden Maximalwasserstand zu sehen, der in erster Linie durch das Abschmelzen extremer Schneemengen (es wird indirekt von bis zu ca. 1,5 m Höhe berichtet) in Verbindung mit Starkregen verursacht wurde. Weiterhin erscheint die quasi kontinuierlich zunehmende Spiegeldifferenz zwischen Trier (knapp 1 m) und Cochem (1,84 m) zum Hochwasser von 1993 beachtenswert. Dies lässt auf seinerzeitige, außergewöhnlich hohe Zuflüsse aus Eifel und Hunsrück schließen. Ein Indiz hierfür dürften auch Berichte sein (SARTOR 2010), wonach in Klüsserath ein Haus von den Fluten der Mosel und der dort mündenden Salm zerstört wurde, in das zuvor rund vierzig Menschen geflüchtet waren. Sechzehn von ihnen kamen dabei ums Leben.

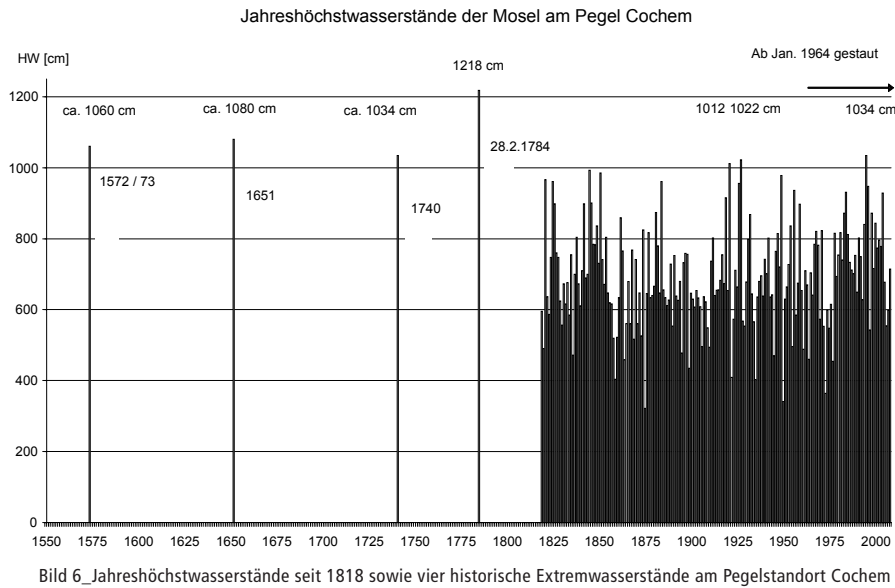
Analog zum Ereignis von 1572/73 (Bild 5) wurden auch die zugeordneten Durchflüsse zu den Hochwassern von 1651, 1740 und 1784 mittels Wasserspiegellagenberechnung auf Plausibilität geprüft. Neben den genannten Ereignissen zeugen weitere Einzelmarken aus den Jahren 1663, 1697, 1718, 1734, 1761 und 1770 sowie zahlreiche Berichte (u.a. zu 1658) von großen Hochwassern bereits vor dem Beginn der Pegelaufzeichnungen von 1817. Festzuhalten wäre, dass davon mit großer Sicherheit diejenigen von 1572/73, 1651, 1740 und 1784 das „Jahrhundertereignis“ von 1993 erreicht oder übertroffen haben und aufgrund der zuvor beschriebenen, relativ guten Datenlage in die Statistik mit einbezogen werden konnten.

### Statistische Auswertungen und Schlussfolgerungen

Als erster Schritt wurden durch Klassenbildung und -auswertung gemäß Tab. 1 alle offiziellen Wasserstandsdaten von Cochem seit dem Abflussjahr 1818 auf eine Zunahme von Hochwasserhäufigkeiten untersucht. Als Schwellwert wurde der nach (BUSCH ET AL 2007) erstmals schadbringende Wasserstand von 680 cm ( $Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) gewählt, der in etwa einem 2-jährlichen Hochwasser entspricht. 95 % der so erfassten Ereignisse traten im Winterhalbjahr auf.

Den Ergebnissen in Tab. 1 ist zunächst entnehmbar, dass in den letzten Jahrzehnten die Zahl der Hochwasserereignisse zugenommen hat. Allerdings beschränkt sich diese Zunahme auf die kleinen und mittleren Ereignisse, was sich am deutlichsten bei den 30 Jahres-Intervallen für den Wasserstandsbereich zwischen 780 und 879 cm zeigt.





Obwohl das Ereignis vom Dezember 1993 den höchsten Wasserstand aller Ereignisse aus Tab. 1 lieferte, ist bei den großen Ereignissen (ab 980 cm) insgesamt keine Zunahme erkennbar. Dies deckt sich mit der in der Fachliteratur vorherrschenden Meinung, dass anthropogene Eingriffe wie Gewässerausbau, Bebauung, Ackerbau etc. vor allem bei der Genese kleinerer Ereignisse von Bedeutung sind, während sie bei extremen Hochwassern kaum noch eine Rolle spielen (DEUT.-LUX. EXPERTENGRUPPE 1995, SARTOR 1998, DWA 2006).

Unsicherheiten bestehen dagegen u.a. hinsichtlich dem Einfluss des Klimawandels auf die Eintrittswahrscheinlichkeit großer Hochwasser (BORDOSSY&PAKOSCH 2005, GRÜNEWALD 2008). Bezüglich der Frage nach einem Trend bei den Moselhochwassern kommen vorangegangene Studien (PREDEEK 1990, BARDOSSY& PAKOSCH 2005) zu widersprüchlichen Ergebnissen, was auf unterschiedliche Methoden und Untersuchungszeiträume zurückzuführen sein mag. Hält man sich bei der Analyse an das Merkblatt 251 (DVWK 1999), so kommt man für die in (BORDOSSY& PAKOSCH 2005) gewählte Reihe der Jahreshöchstabflüsse seit 1901 ebenfalls zu dem Ergebnis eines signifikanten Trends (Signifikanzniveau 5 %). Verwendet man allerdings die Reihe seit 1818, so ergibt sich (in Übereinstimmung mit (PREDEEK 1990)) nur noch ein schwach positiver, nicht signifikanter Trend. Auch die in Bild 6 mit dargestellten historischen Ereignisse vor 1818 liefern keinen Hinweis auf einen positiven Trend.

Mit den erhobenen Daten wurde unter Einbeziehung (wie in Bild 7 skizziert) der historischen Ereignisse seit dem Abflussjahr 1573 eine Wahrscheinlichkeitsanalyse nach (DVWK 1999) durchgeführt. Hiermit ist zwangsläufig u.a. die Annahme verbunden, dass sich alle nicht berücksichtigten Hochwasserereignisse (unter  $\min HQ_h = HQ(1993)$ ) zwischen 1574 und 1817 hinsichtlich ihrer statistischen Merkmale wie diejenigen zwischen 1818 und 2007 verhalten. Bei der Auswahl aus der Vielzahl in Frage kommender Verteilungsfunktionen und Parameterschätzmethoden wurde der (für den oberen Bereich der Anpassung besonders aussagekräftige) Quantil-Korrelationskoeffizient stärker als die Prüfgrößen des KS- und  $\omega_2$ -Tests gewichtet. Dies wird auch durch jüngere Publikationen bestätigt (WALTHER ET AL 2009).

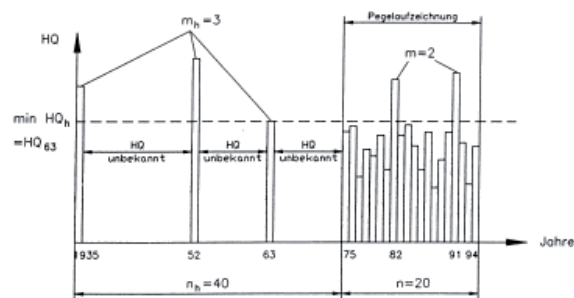


Bild 7\_Prinzipskizze zur Berücksichtigung historischer Hochwasserereignisse nach (DVWK 1999)

Die Anpassung der vier historischen Ereignisse an die maßgebende Verteilungsfunktion ist Bild 8 entnehmbar und die wichtigsten Prüfgrößen der Tabelle 2. Die Abflussvariation beim weniger gut abgesicherten Ereignis von 1572/73 bewirkt keinen wesentlichen Unterschied. Folglich kann dem „Jahrtausendereignis“ von 1784 ein Wiederkehrintervall von weit über 500 Jahren zugeordnet werden und dem „Jahrhunderthochwasser“ von 1993 (näherungsweise mit der amtlichen Statistik übereinstimmend) von nur etwas über 50 Jahren. (ENGEL 2001) kommt für das Hochwasser von 1784 nur zu einem Wiederkehrintervall von etwa 500 Jahren, was insofern plausibel erscheint, da die Extremereignisse von 1572/73, 1651 und 1740 nicht berücksichtigt wurden.

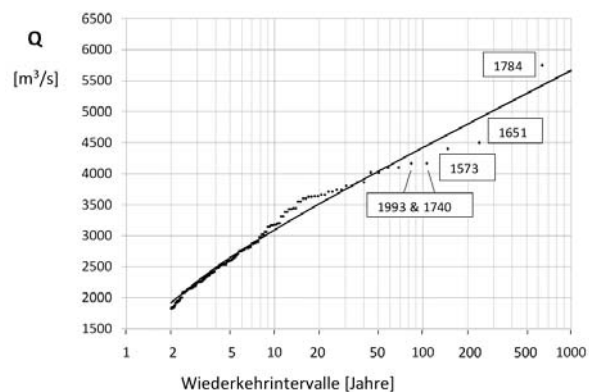


Bild 8\_Ergebnis der Wahrscheinlichkeitsanalyse bei Berücksichtigung von vier historischen Einzelereignissen seit 1573 ( $Q = 4400 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und Pegeldaten seit 1818

Parameter	1818 – 2007	1818 – 2007 und 1573 (Q = 4170 m³/s), 1651, 1740, 1784	1818 – 2007 und 1573 (Q = 4400 m³/s), 1651, 1740, 1784
Ausgangswerteanzahl	190	194	194
Minimum [m³/s] (Abflussjahr)	484 (1874)	484 (1874)	484 (1874)
Mittelwert [m³/s]	2004,6	2026,6	2027,2
Maximum [m³/s] (Abflussjahr)	4170 (1994)	5750 (1784)	5750 (1784)
Standardabweichung	771,3	808,2	809,9
Schiefekoeffizient	0,655	0,867	0,877
Verteilungsfunktion	Allgemeine Extremwert- verteilung	Log Pearson 3	Log Pearson 3
Parameterschätzung	Maximum- Likelihood- Methode	Momentenmethode	Momentenmethode
Prüfgröße D des KS-Tests	0,063	0,062	0,062
Prüfgröße des $\chi^2$ -Tests	0,134	0,278	0,278
Quantil-Korre- lation $r_p^2$	0,989	0,990	0,991
HQ <sub>50</sub> [m³/s]	3840	4030	4040
HQ <sub>100</sub> [m³/s]	4150	4410	4420
HQ <sub>500</sub> [m³/s]	4790	5270	5290

Tab. 2 Parameter der Wahrscheinlichkeitsanalyse für verschiedene Jahres-HQ-Reihen des Pegels Cochem unter Einbeziehung historischer Ereignisse

Insgesamt lassen sich aus der vorgenommenen statistischen Analyse verschiedene Schlussfolgerungen ziehen. Zum einen ist wie für Elbe und Oder (MUDELSEE ET AL 2003) unter Hinzuziehung historischer Daten auch für die Mosel (bezüglich Jahreshöchstabflüssen ab 1818) ein positiver Trend nicht nachweisbar. Betrachtet man zudem die vier großen Hochwasser zwischen 1572/73 und 1784, so könnte auch hier eine Abnahme auf Grund der zurückgehenden extremen Winter mit massiven Schneeschmelzeereignissen und Eishochwassern vorliegen, wie sie vor allem zur Zeit der „kleinen Eiszeit“ (GLASER 2008) Ende des 18. Jahrhunderts vorherrschten. Zumindest bislang (noch) scheint dieser Effekt folgenreicher zu sein, als die seit ca. 100 Jahren zunehmenden Winterniederschläge. So ist der (laut Medien) „Jahrhundertflut“ von 1993 nur ein Wiederkehrintervall von rund 50 Jahren zuzuordnen. Da es das größte Hochwasser seit 1784 (also seit über 200 Jahren) war, erscheint ein „echtes“ Jahrhundertereignis theoretisch also eher überfällig. Zu ähnlichen Schlüssen kommt auch (SCHMIDT 2001).

In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, dass bei Betrachtung von Bild 6 immer wiederkehrende Perioden mit einer Konzentration an größeren Ereignissen auffallen, so besonders in den 1820er, 1840er, 1920er und 1990er Jahren, die dann von Phasen mehr oder weniger scheinbarer bzw. „trügerischer“ Ruhe für die Flusssanlieger unterbrochen wurden. Dies unterstreicht u.a. die Notwendigkeit der Sensibilisierung von potentiell Betroffenen während hochwasserfreier Zeiten im Rahmen der nachhaltigen Hochwasservorsorge, wie sie z.B. in (LAWA 1995) definiert ist. Erfahrungsgemäß wirken bei den Betroffenen theoretische Analysen und Vorhersagen dann besonders glaubwürdig, wenn ein Bezug zu historischen Ereignissen hergestellt wird, deren seinerzeitige Ausmaße vor Ort in Form alter Hochwassermarken optisch nachvollziehbar sind.

### Zusammenfassung

Zur Verbesserung der statistischen Analyse wurde gemäß dem Merkblatt 251 (DVWK 1999) die insgesamt 190 Jahre umfassende Pegelreihe Cochem um die historischen Hochwasser von 1572/73, 1651, 1740 und 1784 ergänzt, die alle mit großer Sicherheit das Dezemberhochwasser von

1993 erreicht oder (z.T. deutlich) überschritten hatten. Die zusätzlichen Daten wurden überwiegend aus über 900 aufgemessenen Hochwassermarken abgeleitet und mittels Längsschnitten, hydraulischen Berechnungen sowie historischen Berichten auf Plausibilität geprüft.

Im Ergebnis zeigte sich, dass zwar die kleinen und mittleren Moselhochwasser in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben, ein positiver Trend in den Jahreshöchstabflüssen und insbesondere in den Extremereignissen kann aber nicht bestätigt werden. Ursache hierfür mögen die zunehmend milderen Winter sein, wodurch frühere Schneeschmelzhochwasser unwahrscheinlicher werden. Das sogenannte Jahrhundertereignis vom Dezember 1993 war zwar das größte Hochwasser seit über 200 Jahren, ihm konnte mittels statistischer Analyse aber nur eine Jährlichkeit von rund 50 Jahren zugeordnet werden.

### Danksagung

Ganz herzlichen Dank sei Herrn Dipl. Meteorologen Norbert Busch von der BfG sowie Herrn Dipl.-Ing.(FH) Karl-Heinz Zimmer als ehemaligem Mitarbeiter der Wasserwirtschaftsverwaltung in Trier gesagt für die vielfältige Unterstützung bei dieser Studie. Dies gilt insbesondere für die Wasserspiegellageberechnungen durch Herrn Busch sowie für die umfangreichen historischen Recherchen durch Herrn Zimmer. Zudem sei der Firma DHI-WASY gedankt für die Bereitstellung programminterner Daten<sup>2</sup> zur Verwendung in Bild 8.

Prof. Dr.-Ing. Joachim Sartor

Fachbereich BLV

<sup>1</sup> Die genaue Jahreszahl ist strittig (1524 oder 1534), weil die in Sandstein gemeißelte Marke z.T. undeutlich ist. Da diese Angabe für die weiteren Untersuchungen ohne Belang ist, wurde die Interpretation aus (VOGTS 1938) übernommen.

<sup>2</sup> Alle statistischen Berechnungen wurden mit dem Softwarepaket HQ-EX 3.0 der Fa. DHI-WASY GmbH aus Dresden durchgeführt.

## Literatur

- BARDOSSY, ANDRAS; PAKOSCH, SABINE: Wahrscheinlichkeiten extremer Hochwasser unter sich ändernden Klimaverhältnissen. Die Wasserwirtschaft, Heft 7-8, 2005
- BOHR, VOLKER; STRAUB, DIRK: Historische Hochwasserereignisse an der Mittelmosel. (Unveröffentlichte) Diplomarbeit an der FH Trier, Fachbereich Bauingenieurwesen, 1996\*
- BORK, HANS-RUDOLF; BORK, HELGA; DALCHOW, CLAUS; FAUST, BERNO; PIÖRR, HANS-PETER; SCHATZ, THOMAS: Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Verlag Klett-Perthes, Gotha, 1998
- BUSCH, NORBERT; ENGEL, HEINZ; ZIMMER, KARL-HEINZ: Untersuchungen zur Wirkung denkbarer Rückhaltemaßnahmen an der französischen Obermosel auf den Hochwasserablauf der Mosel. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 2, 1996
- BUSCH, NORBERT; MEIBNER, DENNIS; WERNER, GÜNTHER; HERMANN, OLGA: Betrieb der Stauanlagen an der Mosel und ihr Einfluss auf Hochwasser. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 1, 2007
- DEUTSCH-LUXEMBURGISCHE EXPERTENGRUPPE „HOCHWASSER-HYDROLOGIE MOSEL/SAAR“: Hochwasserhydrologie Mosel und Saar im deutschen Einzugsgebiet, 1995
- DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT; ABWASSER UND ABFALL e.V. (DWA): Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Fachthemenband, 2006
- DWA: Erschließung und Einbeziehung historischer Informationen für die Ermittlung extremer Hochwasserabflüsse. Fachthemenband, 2008
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU e.V. (DVWK): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Merkblatt 251, 1999
- ENGEL, HEINZ: Bestimmung extremer Abflüsse und Spiegellagen an der Mosel (unveröffentlichte Studie der BfG). Koblenz, 2001
- GLASER, RÜDIGER: Klimageschichte Mitteleuropas. Primusverlag, 2008
- GRÜNEWALD, UWE: Klimawandel, Hochwasserrisikomanagement und Bewirtschaftung der Wasserressourcen in Flusseinzugsgebieten. KW, Heft 1, 2008
- KRAMES, KARL: 175 Jahre Pegel Cochem, Kreisjahrbuch Cochem-Zell, 1992
- KREMER, PETER: Hochwasserjahre an der Mosel. Heimatbuch für den Landkreis Trier, 1965
- LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz., 1995
- MANGEN, TOM; THIEL, LAURENT: Erstellung eines Hochwasserlängsschnitts für die Mosel zwischen Schengen und Trier. (Unveröffentlichte) Bachelor Thesis an der Universität Luxembourg, 2008
- MÜLLER, LUDWIG: Witterungsbeobachtungen. Trier, 1813
- MUELSE, MANFRED; BÖRNGEN, MICHAEL; TETZLAFF, GERD; GRÜNEWALD, UWE: No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe. NATURE, Vol. 425, 11. September 2003
- PREDEEK, ALBERT: Die Wasserstand-Abfluss-Beziehung an ausgewählten Pegeln der Mosel. (Unveröffentlichte) Diplomarbeit an der Universität Trier, Fachbereich VI, 1990
- PRESS, HEINRICH; SCHRÖDER, RALPH: Hydromechanik im Wasserbau. Verlag Wilhelm Ernst, Berlin 1966 (S. 387)
- REITZ, GEORG: Geschichte von Ernst, 1932 via Herrn Joachim Barden, Ernst (sowie Originalunterlagen im Bistumsarchiv Trier)
- SARTOR, JOACHIM: Mögliche Einflüsse der Bebauung auf den Hochwasserabfluss. Die Wasserwirtschaft, Heft 3, 1998
- SARTOR, JOACHIM: Das Jahrtausendhochwasser der Mosel von 1784. Kreisjahrbuch Bernkastel-Wittlich 2010
- SCHMIDT, MARTIN: Jahrhunderthochwasser vergangener Jahrhunderte. Wasser und Abfall, Heft 11, 2001
- SCHMITZ; ERNST: Eisgang und Hochwasser der Mosel. Kreisjahrbuch Cochem-Zell, 1995
- SIROCKO, FRANK: Wetter, Klima, Menschheitsentwicklung. Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, 2009
- STEINERT, MARC; STINNER, BERNHARD: Erstellung eines historischen Hochwasserlängsschnitts für die Mittelmosel. (Unveröffentlichte) Diplomarbeit an der FH Trier, Fachbereich Bauingenieurwesen, 1994\*
- VOGTS, HANS: Die Kunstdenkmäler des Kreises Zell an der Mosel. Verlag L. Schwann, Düsseldorf, 1938
- WALTHER, JÖRG; HAUPT, RALF; MIEGEL, KONRAD; SCHRAMM, MICHAEL: Alternative Kriterien für die Modellslektion in der Hochwasserstatistik. Wasser und Abfall, Heft 11, 2009
- WEIKINN, CURT: Quellentexte zur Witterungsgeschichte Europas von der Zeitenwende bis zum Jahre 1850. Akademie-Verlag, Berlin 1958/63 und Verlag Borntraeger, Berlin, 2000
- WESTERMANN, WILLI: Das Jahrtausendhochwasser von 1784. Arbeitskreis für Heimatkunde Mittelmosel. Traben-Trarbach, Jahreszeitschrift 1994
- WOLPERT, WOLFGANG: Hochwasser 1740 in Ediger. Heimat zwischen Hunsrück und Eifel, Nr. 2, 1980
- WYTTENBACH, JOHANN HUGO; MÜLLER, MICHAEL: Gesta Trevirorum. Trier, 1839
- ZENTRALBUREAU FÜR METEOROLOGIE UND HYDROLOGIE IM GROSSHERZOGTUM BADEN: Ergebnisse der Untersuchung der Hochwasserverhältnisse im Deutschen Rheingebiet. VII. Heft, Das Moselgebiet, Berlin, 1905

\*: Die Diplomarbeiten (STEINERT&STINNER 1994) und (BOHR&STRAUB 1996) sind incl. Längsschnitten und Lageplänen auch im Internet unter [www.biserver.bi.fh-Trier.de](http://www.biserver.bi.fh-Trier.de) – downloads – Sonstige zu finden



## 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

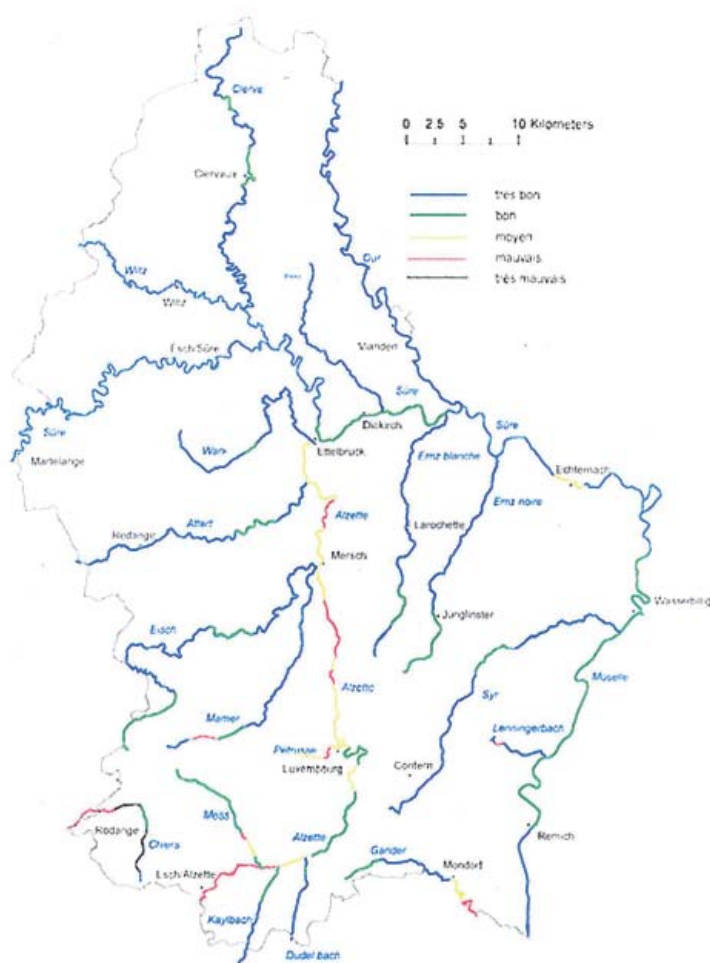
Als wir davon gehört haben, dass wir bei „Jonk Fuerscher“ eine wissenschaftliche Arbeit einreichen können, sahen wir das als Gelegenheit an, uns außerhalb der Schule ein Problem zu stellen und autonom damit arbeiten zu können. Zunächst gingen wir auf Ideensuche. Wir trafen bald auf das sehr vielseitige Thema „Wasser“. In diesem Bereich gibt es viele Möglichkeiten zum forschen. Wir suchten nach einem Projekt, das sich über 2 bis 3 Monate zieht und wobei wir das Problem auf physikalische, chemische, und biologische Weise untersuchen konnten. Als Schüler einer 3e C liegen unser Interesse und unsere Stärke in den Naturwissenschaften. So einigten wir uns darauf, die Wasserqualität in den luxemburgischen Flüssen zu untersuchen.



Concours Jeunes Scientifiques 2011

## WASSERQUALITÄT IN LUXEMBURGISCHEN FLÜSSEN\_

Bob Bertemes, Pit Schwartz



Die Wassergüte der luxemburgischen Flüssen Quelle: waasser.lu

Wir sprachen unsere Biologieprofessorin, Frau Rehlinger auf unsere Idee an. Sie gab uns jede Menge Daten und Dokumentation und wir sahen zum ersten Mal einen Sinn in unserem Projekt. Die Idee wurde konkreter... Außerdem ließ uns Frau Rehlinger zwei portable Minicomputer zur Erfassung physikalischer und chemischer Daten und Teststäbchen zur Analyse des Wassers auf verschiedene chemische Parameter. Dadurch stand auch fest, wie unsere

Methode aussehen würde. Wir nahmen uns vor, mit Hilfe der Instrumente die Flüsse Alzette, Schwebach, Attert und Sauer regelmäßig zu untersuchen.

Unser Projekt ist keineswegs komplett, was die Aussagekraft über alle luxemburgischen Flüsse angeht da wir uns nur auf diese wenigen beschränkt haben. Es war uns jedoch zeitlich und logistisch nicht möglich, alle Flüsse zu untersuchen, was ja auch nicht verlangt wurde. Unser Projekt war für uns eine Gelegenheit, uns mit den Methoden von Hydrologen vertraut zu machen.

Wir informierten uns wie man die Güte eines Gewässers noch untersuchen kann und stießen auf die Methode zur Ermittlung des Saprobienindex. Bei dieser Methode geht es darum anhand der Präsenz von verschiedenen Insektenlarven und wirbellosen Tieren die Güte des Gewässers zu bestimmen.

Doch mit der Durchführung wollten wir noch bis zum Frühjahr warten, da im Winter noch nicht genug Tiere vorhanden sind und die Messung falsche Schlussfolgerungen hervorrufen könnte.

Nach der ersten Phase, der Suche nach dem geeigneten Thema und Methode folgte die zweite Phase, die Aufnahme von Informationen. Wir teilten uns die Arbeit auf, Bob übernahm die Schwebach, Attert und Sauer, Pit die Alzette in Dommeldingen, Walferdingen und Mersch. Wir besuchten die gleichen Stellen wöchentlich um die Daten aufzunehmen. Nach ein paar Messungen konnten wir schon erste Schlussfolgerungen ziehen. Auf den genauen Ablauf einer Messung und die Ergebnisse gehen wir im Kapitel „Unsere Methode“ genauer ein.

Die Datenaufnahme zog sich über zwei Monate, vom Februar bis April, und war somit die längste Phase unseres Projektes. Dann fingen wir an, unsere Daten auszuwerten, Graphen anzufertigen und mit bekannten Daten aus zuverlässigen Quellen zu vergleichen. Die letzte Phase ist dann die Verfassung eines verständlichen Textes, den wir dann bei „Jonk Fuerscher“ einreichen können.

### Die luxemburgischen Flüsse

Damit unser Projekt noch für uns vertretbare Ausmaßen behalten konnte, konzentrierten wir uns ausschließlich auf



Flüsse in unserer Nachbarschaft und kombinierten die Messungen mit unseren Hobbies. Bob, der in Kapweiler nahe Saeul lebt und einmal wöchentlich wegen der Leichtathletik nach Diekirch fährt, nahm sich natürlich Flüsse aus dieser Gegend vor. Pit, der in Heisdorf nahe Walferdingen lebt und einmal wöchentlich auch wegen seinem Hobby nach Mersch fährt, nahm sich die Alzette vor. So konnten wir unserem Projekt während zwei Monaten regelmäßig und konsequent nachgehen. Dokumentationen, die vom „Naturpark Oewersauer“ publiziert wurden und die Internetseite des Wasserwirtschaftsamtes, „Waasser.lu“ gepflegten uns mit bereits bestehenden Daten. Aus diesen Informationen konnten wir schon ahnen, wie unsere Ergebnisse aussehen würden.

### Schwebach

Die Schwebach entspringt in Schweich und mündet in Useldange in die Attert.

### Attert

Die Attert ist ein 38km langer Fluss der in einer Ortschaft in Belgien namens Thiaumont entspringt. Das Quellgebiet liegt in den Ardennen. Der Fluss läuft in östliche Richtung und erreicht kurz nach Grendel die luxemburgische Grenze. Sie mündet bei Colmar-Berg in die Alzette.

### Alzette

Die Alzette ist ein 73km langer Fluss. Sie entspringt in Frankreich bei dem Ort Audun-le-Tiche. Sie durchzieht Luxemburg von Süd nach Nord. Sie mündet in Ettelbrück in die Sauer.

### Sauer

Die Sauer ist ein 173km langer Fluss. Sie entspringt als „Sûre“ im Südosten Belgiens in den Ardennen. Sie bildet von Wallendorf bis Wasserbillig eine natürliche deutsch-luxemburgische Grenze über 50km. Dort in Wasserbillig mündet die Sauer in die Mosel.

Das folgende Dokument gab uns Aufschluss darüber, dass Pit, der die Alzette übernahm wahrscheinlich schlechtere Ergebnisse als Bob erhalten würde.

Die Güte der Flüsse auf dieser Karte wurde anhand biochemischer Faktoren festgelegt, was unserer Methode sehr gleicht. Diese biochemischen Faktoren sind der Gehalt an gelöstem Sauerstoff und Ammonium im Flusswasser.

### Unsere Methode

Wie schon oben beschrieben, standen uns als Hilfsmittel der Minicomputer und die Teststäbchen zur Verfügung. An unseren Messstellen ließen wir einen Eimer an einer Schnur runter um diesen mit Wasser zu füllen. Dann zogen wir den Eimer wieder heraus und starteten den Minicomputer, schlossen die Sonden an und steckten sie ins Wasser. Nun konnte der Computer die Daten aufnehmen. Dies konnte einige Augenblicke dauern bis die Werte sich stabilisierten. Die chemische Analyse mit den Teststäbchen konnten wir nicht vor Ort durchführen, da das Wasser für diese Untersuchungen mindestens 15° C haben muss. Deshalb nahmen wir Proben aus unserem Eimer mit nach Hause um sie dort auf gewünschte Temperatur zu bekommen um die Untersuchungen durchzuführen.

### Minicomputer: Pasco Spark Science Learning System

Dieser Computer stand uns zur Verfügung um die Messungen vor Ort durchzuführen. Der Pasco Spark ist gedacht um Schüler bei ihren Experimenten zu unterstützen und deshalb sehr einfach aufgebaut. Wir mussten den Computer starten, die gewünschten Sensoren einstecken und der Computer begann seine Messungen sofort. Die Ergebnisse wurden sehr übersichtlich aufgelistet. Wir mussten die Daten nur noch rausschreiben. Es ist auf diesem Gerät möglich Daten in einen Graphen einzufügen, doch wir schrieben die Daten lieber raus und verarbeiteten sie im Windows Pro-



Messung mit dem Spark

gramm „Excel“. Die verschiedenen Messsonden gaben uns Informationen über:

#### Den gelösten Sauerstoff im Wasser

Das Messgerät gibt den absoluten Sauerstoffgehalt in mg/L sowie den relativen Sauerstoffgehalt in % wobei 100 % 20 mg/L entsprechen an. Dieser Sauerstoffgehalt gibt Aufschluss über die Wasserqualität. Der Gehalt hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum einen vom Stoffwechsel vom Wasserlebewesen, wobei die meisten Pflanzen Sauerstoff produzieren und Wassertiere ihn verbrauchen. Aber auch von dem Austausch der Grenzflächen des Gewässers und der Atmosphäre. Der Sauerstoffhaushalt kann außerdem durch die Präsenz von chemischen Stoffen wie Stickstoffhaltigen Verbindungen negativ beeinträchtigt werden. Da unsere Messungen im Winter stattfanden, hatten die Stoffwechsel betreffenden Faktoren keinen so großen Einfluss auf den Sauerstoffgehalt wie im Sommer. Doch die Wassertemperatur spielt im Bereich chemischer Prozesse eine wichtige Rolle da die oxidativen Prozesse bei Kälte verlangsamt werden und so der Sauerstoffgehalt im Winter trotzdem relativ hoch ist. Die Sonde zum Erfassen der Daten wird in einer Kaliumchlorid Lösung aufbewahrt.

#### Den pH-Wert des Wassers

Der pH-Wert im Wasser drückt dessen Säuregehalt aus. „pH“ bedeutet „pondus hydrogeni“. Der pH ist ein Wert zwischen 0 und 14 ohne Einheit. Bei dem Wert 7 spricht man von pH-neutral, über 7 von alkalisch und unter 7 von sauer. Im Flusswasser liegt der pH-Wert meist zwischen 6 und 8. Die Sonde zum Erfassen der Daten wird in einer Kaliumchlorid Lösung aufbewahrt.

#### Die Luft/Wasser Temperatur

Die Luft/Wasser Temperatur haben wir in °Celsius gemessen.

#### Die Leitfähigkeit des Wassers

Der Leitwert wird in µS/cm (Mikro-Siemens pro cm) angegeben. Die Leitfähigkeit von Wasser gibt Aufschluss darüber wie viele gelöste Stoffe sich im Wasser befinden. So hat Meerwasser beispielsweise eine höhere Leitfähigkeit als Wasser aus dem Hahn.

### Teststäbchen Merckoquant

Die chemischen Analysen haben wir mit Teststäbchen der Marke Merckoquant durchgeführt. Wir nahmen jeweils eine Probe mit nach Hause damit das Wasser mindestens 15° C erreicht um eine korrekte Messung durchführen zu können.

### Wir untersuchten die Proben auf

#### Die Carbonathärte

Die Wasserhärte ist der Gehalt an Calciumionen im Wasser. Ein Grad deutscher Härte entspricht 10 mg Calciumoxid pro Liter. Die Carbonathärte gibt uns Aufschluss über die



Die von uns verwendeten Teststäbchen

Gesamthärte da sie bei normalen pH-Bedingungen (pH >8) im Verhältnis zu den Calciumionen steht.

den Phosphatgehalt/ Nitritgehalt/Nitratgehalt

Der Phosphatgehalt/ Nitritgehalt/Nitratgehalt im Wasser wird durch Düngemittel beeinflusst. Der Gehalt wird in mg pro Liter angegeben und ist im Flusswasser gering.

den Sulfatgehalt



Messung mit den teststäbchen

Der Sulfatgehalt im Wasser wird durch Düngen, Herauslösen aus Gestein und Verbrennung schwefelhaltiger Stoffe die durch den Niederschlag ins Flusswasser gelangen beeinflusst.

### Vergleich mit bekannten Daten und Schlussfolgerung

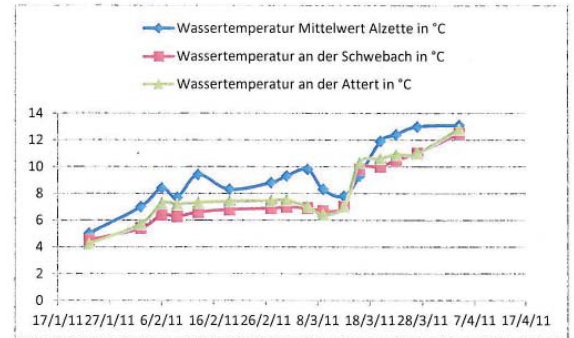
In diesem Kapitel behandeln wir unsere Beobachtungen und Schlussfolgerungen. Wir verarbeiteten die Daten in „Windows Excel“. Wir füllten unsere gemessenen Parameter in eine Tabelle ein, wobei ein Messungstag einer Tabelle entspricht.

Oben sieht man die Tabelle einer Messung der Alzette. Die gemessenen Werte an diesem Tag liegen in einem guten Durchschnitt aller gemessenen Tage, deshalb haben wir diese Tabelle repräsentativ gewählt. Wir werden jetzt die einzelnen Ergebnisse analysieren und mit bekannten Daten vergleichen. Wir haben Daten über den Bewirtschaftungsplan für das Großherzogtum Luxemburg erhalten. Die luxemburgischen Flüsse wurden untersucht und Maßnahmen wurden präsentiert, um die Qualität der Oberflächengewässer und der Grundwässer zu verbessern. Wir interessierten uns für die Grenzwerte nach chemisch-physikalischen Parametern von Fließgewässern. Dadurch konnten wir nämlich die von uns gemessenen Daten mit den Grenzwerten vergleichen. Die folgende Tabelle zeigt diese Grenzwerte, Stand 2009.

### Temperatur

Über die Wassertemperatur können wir nicht viel sagen, da wir unsere Messungen im Winter durchgeführt haben.

Dennoch sieht man, dass die Temperatur von Februar bis April gestiegen ist. Auf dem Diagramm erkennt man, dass die Temperatur der Alzette ein wenig höher war als die der anderen drei Flüsse. Für die Alzette wurde ein Mittelwert gerechnet, da die Messungen an der Alzette an 3 Stellen durchgeführt wurden.



Die steigende Wassertemperatur im Frühling

### Gelöster Sauerstoff

An einer anderen Stelle des Berichts über den Bewirtschaftungsplan fanden wir eine Bemerkung über den Sauerstoffgehalt in der Alzette. Da heißt es: Auszug aus Tabelle „Alzette Steinsel Heisdorf“

Diese Vorahnung hat sich bei uns auch bewahrheitet, der Sauerstoffgehalt, den wir in der Alzette gemessen haben, liegt unter den Richtlinien und unter dem gemessenen Sauerstoffgehalt in der Schwebach und Attert. Der niedrige Sauerstoffgehalt der Alzette, zum Teil weniger als 30% des Sättigungswertes, und die relativ hohe Leitfähigkeit zeigen darauf hin dass die Alzette belastet ist mit organischen Stoffen die abgebaut werden müssen von Bakterien. Diese können sich bei dem großen Nahrungsangebot schnell vermehren und entziehen dem Wasser den Sauerstoff durch ihre Zellatmung. Wahrscheinlich gibt es noch nicht genug Kläranlagen und zu viele Einwohner entlang dieses Gewässers, besonders im Süden des Landes und in Frankreich, die mit ihrem Haushaltsabwasser die Alzette belasten.

### pH-Wert

Die Angabe der Tabelle mit den Grenzwerten was den pH-Wert betrifft ist zwischen 6.5 und 8.2. Dieser Wert wurde in der Alzette, Schwebach und Attert eingehalten. Was uns auffiel ist, dass der Grenzwert in der Sauer überschritten wurde. Dies ist möglicherweise dadurch zu erklären, dass das Wasser der Quellen und die Zuläufe der Obersauer, die Obersauer selbst und ein Teil der Untersauer die belgischen und luxemburgischen Ardennen durchlaufen. Hier findet man nur kalkarmes Gestein der Devonzeit (Schiefer und Quarzite) wodurch sich fast keine Kalk- oder Magnesiumkarbonate in diesem Wasser lösen können. Diese Salze bewirken in anderen Gewässern, im luxemburger Sandstein zum Beispiel, dass der pH-Wert um 7 und höher ist.

*Jetzt kommen wir zu den chemischen Analysen, die wir mit den Teststäbchen durchgeführt haben.*

### Phosphat- und Nitritgehalt

Mit der Messstäbchenmethode konnten wir in unseren Proben keine Phosphate und Nitrite nachweisen. Das Stäbchen färbte sich nicht. Dies zeigt uns, dass der Wert vermutlich ganz gering war. Die Grenze liegt bei Phosphaten bei 0.033 mg/L und bei Nitriten bei 0.03 mg/L. So kleine Dosen konnten unsere Messstäbchen nicht nachweisen.

### Nitratgehalt

Die Grenzwerte für Nitrate im Wasser liegen bei 10 mg/L für sehr gutes Wasser, bei 25 mg/L für gutes Wasser und bei 50 mg/L für mäßiges Wasser. Unsere Messungen gaben uns zum Teil bis zu 50 mg/L an, unabhängig vom Gewässer



<b>Sonstige physikalisch-chemische Defizite</b> Anhang V, WRRL	Sauerstoffdefizit	Maßnahmen zur Verbesserung des Sauerstoffgehaltes (Ausgleich des Defizits mittels Durchführung anderer ergänzender Maßnahmen)
--	-------------------	---

Auszug aus Tabelle "Alzette Steinsel Heisdorf"  
Quelle: [www.eau.public.lu/actualites/2008/12/plan\\_de\\_gestion/plan\\_de\\_gestion.pdf](http://www.eau.public.lu/actualites/2008/12/plan_de_gestion/plan_de_gestion.pdf)

<b>Datum</b>	06.03.2011	06.03.2011	06.03.2011
<b>Ort</b>	Mersch	Walferdange	Dommeldange
<b>Zeit</b>	11:24	12:28	12:43
<b>Gewässer</b>	Alzette	Alzette	Alzette
<b>Lufttemperatur in °C</b>	8,4	9,1	9,9
<b>Wassertemperatur in °C</b>	7	8,5	8,6
<b>PH-Wert</b>	7,38	7,53	7,51
<b>Sauerstoffgehalt in %</b>	18,3	26,7	31,1
<b>Sauerstoffgehalt in mg/l</b>	3,7	5,6	6,1
<b>Leitfähigkeit in µs/cm</b>	704	640	589
<b>Nitritgehalt in mg/L</b>	0	0	0
<b>Carbonat Härte in °d (deutsche Grade)</b>	12	12	12
<b>Sulfatgehalt in mg/L</b>	200-400	200-400	200-400
<b>Nitratgehalt in mg/L</b>	50	25	50
<b>Phosphatgehalt in mg/L</b>	<10	<10	<10

Tabelle einer Messung

aus dem die Probe stammte. Damit sind die Werte immer noch in Ordnung, denn erst ab 100 mg/L Nitraten ist die Wasserqualität mangelhaft.

#### Sulfatgehalt

Die Grenze für sehr gutes Wasser liegt bei den Sulfaten bei 60 mg/L, bei 120 mg/L wird die Qualität immer noch als „gut“ bezeichnet. Da unsere Messstäbchen uns nur angeben, ob der Wert unter 200 mg/L liegt, können wir hier nicht genau sagen, ob die Wasserqualität, was den Sulfatgehalt anbelangt, gut ist.

#### Carbonathärte

Die Carbonathärte lag bei allen Flüssen immer bei 12° deutscher Härte. Die Tabelle gibt uns keine Grenzwerte für die Carbonathärte.

#### Schlussfolgerung

Das Projekt war sehr interessant für uns und es hat uns Spaß gemacht. Wir haben die Handhabung des Pasco Spark gelernt und außerdem haben wir einen Einblick in die Hydrologie bekommen. Es war viel Arbeit um das Ganze auf die Beine zu stellen, doch wir haben mit dem Projekt auch gelernt wie man so eine Arbeit aufbaut, da es was ganz anderes ist als nur ein Schulreferat. Wir haben die Qualität der Gewässer in Luxemburg kontrolliert. Leider haben sich unsere Befürchtungen bewahrheitet: die luxemburgischen Flüsse, vor allem die Alzette, sind mit schädlichen Stoffen belastet. Im Bericht über den Bewirtschaftungsplan wurden Ziele für 2015-2020 festgelegt, die sich hoffentlich durch die vorgenommenen Maßnahmen erreichen lassen. Wir hoffen, dass die Zukunft der luxemburgischen Flüsse besser aussieht als es jetzt der Fall ist. Eine unserer Ideen konnten wir jedoch nicht ausführen. Wie anfangs beschrieben wollten wir nämlich noch einen Saprobienindex über unsere Flüsse durchführen doch da es momentan die falsche Jahreszeit ist haben wir gemeinsam beschlossen unser Projekt im Sommer zu erweitern und auszubauen um nächstes Jahr mit dem erweiterten Projekt wieder am „Concours Jeunes Scientifiques“ teilnehmen.

Bob Bertemes, Pit Schwartz

Parameter	Einheit	Qualitätsklasse				
		Sehr gut	Gut	Mässig	Unbefriedigend	Schlecht
		Umweltqualitätsziel	Umweltqualitätsnorm			
Turbidität	NTU	1	35	70	100	> 100
Temperatur	°C	20	21.5	25	28	> 28
Gelöster Sauerstoff / Oxygène dissous	mg/L O <sub>2</sub>	8	6	4	3	< 3
Sauerstoffsättigung / Sat. en oxygène	%	90	70	50	30	< 30
BSB5 / DBO5	mg/L O <sub>2</sub>	2	5	10	25	> 25
pH	/	6.5 - 8.2	6 - 9	5.5 - 9.5	4.5 - 10	<4.5 >10
P-Phosphat / Phosphate-P	mg/L	0.033	0.163	0.326	0.653	> 0.653
Ammonium - NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	0.1	0.5	2	5	> 5
Nitrit - NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	mg/L	0.03	0.3	0.5	1	> 1
Nitrat - NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	10	25	50	100	> 100
Natrium / Sodium Na	mg/L	200	225	250	750	> 750
Calcium - Ca	mg/L	160	230	300	500	> 500
Magnesium - Mg	mg/L	50	75	100	400	> 400
Chlorid / Chlorures - Cl <sup>-</sup>	mg/L	50	100	150	200	> 200
Sulfat - SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	60	120	190	250	> 250
Kupfer	mg/L	0.1	0.5			
Eisen	mg/L	0.03	0.3			
Mangan	mg/L	10	25			
Zink	mg/L	200	225			

Tabelle mit Grenzwerten, Auszug aus dem "Bewirtschaftungsplan für das Großherzogtum Luxemburg"

The term “electric mobility” is often applied to battery electric vehicles (BEV). BEVs may well be the key to a sustainable future in the individual mobility sector, provided that electrical power generation follows along the same path. Still most passenger cars on today’s European roads are fueled by gasoline or diesel. And this with good reason: today’s conventional vehicles (CV) really are the ultimate driving machines. They offer high performance and high reliability; they work in almost any conditions while keeping the interior at a comfortable temperature; they provide all kind of luxuries like entertainment, navigation and some even park by themselves. Typically, distances of 600-800 km can be covered. Refueling requires a short stop at one of the many fuel stations of the almost ubiquitous fuel-station network. In principle, as long as there’s a road, an ICE-based vehicle will bring you there in great comfort.

Drivetrain electrification

## TOWARDS A SUSTAINABLE INDIVIDUAL MOBILITY\_

Gil Georges



Lithium Batterie Zero  
© ELECTRICVEHICLE Leudelange

Unfortunately, CVs are not very efficient. A typical ICE has a peak thermodynamic efficiency of around 30%, but is mostly operated at low-load, low-efficiency settings. That’s why overall efficiency can fall far below 10%. BEVs on the other hand easily achieve 80% and more. Yet, as will be discussed later, BEVs cannot perform at the same level as CVs due to low battery energy densities. While the fuel tank in a CV provides such a wealth of energy that most drivers do not care about the drop in effective range from having all kinds of auxiliaries draw up to 10 kW of mechanical power, in a BEV each non propulsion related appliance reduces the already short range. Yet some of secondary functions like

e.g. heating are absolutely indispensable. In a worst case scenario, such as driving home on an exceptionally cold and dark winter evening, this could result in the vehicle suddenly running out of power, even though it traveled the same route hundreds of times without incident before.

CV-drivers are not used to this behavior as in a conventional vehicle the fuel gauge indication drops seemingly linearly with distance. To the uninitiated observer the “electricity consumption” of a BEV might therefore appear random. The results in the so called range anxiety phenomenon, i.e. the fear of not reaching one’s destination. It is probably one of the best arguments against buying BEVs, especially considering the additional investment cost over a comparable conventional vehicle. Yet studies show, that the average european driver travels 60 to 80 kilometers on a typical workday; a distance well within a BEV’s capabilities. This is probably especially true for a physically small country like Luxembourg; at least for the locals. Thus from a purely environmentalist point of view, there is no reason not to drive a BEV; one can still e.g. catch a train or rent a conventional vehicle car for the occasional long-distance trip.

The previous statement must of course be put into perspective: even though some manufactures sell their BEVs as “zero emission vehicles”, the actual CO<sub>2</sub> emissions of a BEV depend on the local electricity mix. If the power comes from CO<sub>2</sub> intensive sources like conventional coal powerplants, then the CO<sub>2</sub> emissions per kilometer can actually outgrow those of burning hydrocarbon fuels in a highly efficient hybrid electric powertrain. Thus before labeling a BEV “green”, one has to look at the power production sector as in the end electric mobility delocalizes the sustainability issue.

But that is not the only problem that network operators are facing. The major concern will probably be the consequences of having additional electrical load on the distribution infrastructure. For electricity retailers, e-mobility opens new markets. Essentially they could become what today’s fuel pump operators are to the automotive sector; some want to go even further and provide “mobility services”. On a technical level, new solutions are required since up



until now, electricity consumers were stationary (associated to one meter) and the power requirements were immediate. BEVs however might not always charge at the same spot, and if the only aim is to have a fully charged battery in the morning then charging can occur at any time during the night. With appropriate coordination this allows to actively avoid load peaks and to optimally use the available power generation facilities. In a more advanced setting the combined battery capacities of all attached vehicles could be used for ancillary services or even load balancing the stochastic power outputs of sources like wind turbines.

From a scientific point of view, there are many other implications such as life cycle costs (i.e. costs, energy demand and emissions other than fuel/electricity demand from production, life-time and disposal) or driver behavior that need to be taken into account. This enumeration is probably not complete, but it shows the many aspects of the topic. Even on a purely technological plane the central component of a BEV, battery is an electrical and a chemical system alike. This multidisciplinary is new for all stakeholders.

My research is embedded within THELMA project, which to shed some light on the question to the implications of this new technology by offering objective perspectives from different directions. THELMA is funded by Swiss electric research, CCEM and Union Pétrolière. By combining the expertise of 6 research groups from ETH Zurich, PSI and EMPA a comprehensive analysis of the topic can be delivered. As our investigations focus on vehicle technology, so do the following sections.

### Electric vs. conventional propulsion: simple facts

Using battery powered electric motors for vehicle propulsion is nothing new. Indeed, at the dawn of the "automotive area", the internal combustion engine (ICE) and electric motor (EM) were competing technologies. And as - at the time - combustion engines were bulky, noisy and unreliable devices, many of the first automobiles were actually electric.

This is not surprising as from an engineering point of view, EMs are much better suited for vehicle propulsion than ICEs: (1) EMs can provide torque at standstill (zero torque) and

therefore no energy dissipating clutch is needed. (2) the rotation speed of an ICE has a theoretical maximum, dictated by the energy conversion process (when combustion can no longer "keep up" with the piston movement). Thus to cover the whole range of vehicular operation, a variable transmission gear is necessary. (3) Also, an ICE's maximum torque and efficiency are largely dependent on its current rotation speed, whereas for modern EMs, the influence is almost negligible (below maximum power). (4) Being a thermal machine, an ICE is Carnot limited meaning there's a theoretical maximum to the conversion process's efficiency which is usually Electro-magnetic torque conversion knows no such limitations. That's why electric machines are much more efficient than ICEs.

There are other examples and yet most modern cars are ICE-based. Obviously the reason is not the engine, but its fuel. In fact, one could say that liquid hydro-carbons are the ideal energy vector for mobile applications. With a lower heating value of roughly 44 MJ/kg, one kilo of gasoline stores more than 80 times the energy of a one-kilo Li-ION battery (assuming 150 Wh/kg). Thus even if an EM is 5 times more efficient than a comparable ICE (meaning it requires 5 times less energy to go the same distance), the required battery weighs at least 16 times more than the fuel burned in the reference ICE. To put this into perspective: 60 L of gasoline weigh roughly 44 kg and -theoretically- contain the same energy as a 700 kg Li-ION battery.

Unfortunately, reality is worse: a battery's cycle-lifetime (i.e., roughly put, the number of times it can be charged and discharged) generally drops with the depth of discharge, meaning the more of the available capacity is used, the sooner the device becomes unusable. As batteries are usually the most expensive component in a vehicle project, guaranteeing a minimal lifetime is vital for the economic success. Thus modern electric powertrains typically only use 30-40% of the actual capacity. In the above logic, this would increase the battery mass to astonishing 2.1 t.

Obviously, this is technically unfeasible; typical commercial BEVs (e.g. the Nissan LEAF) carry around 300 kg which explains why BEVs cannot compete with CVs in terms of

range. Of course there is always hope for a “technical revolution”. A very promising candidate is the Li-O<sub>2</sub> cell. Since oxygen is readily available from the atmosphere, one of the electrodes could figuratively be “outsourced” so that it would not contribute to the battery weight. Energy densities of 750 Wh/kg are projected [1] (the theoretical potential is much higher, but especially for automotive applications a battery is not only made of reactive material but it requires a shock-proof casing, insulation, conductors, cooling, monitoring and control). Compared to current 150 Wh/kg this is a big achievement; compared to the more than 44 MJ/kg of gasoline, this is still weak. Also it might still take some time before the first automotive Li-air batteries are available as failsafe ways of shutting ambient humidity out have to be found first.

Besides the limited range, the second shortcoming of battery electric vehicles is recharging time. When charging from a domestic outlet, electrical power “flows” typically at 3 kW (one phase) or 11 kW (all three phases). In contrast, gas pumps refuel passenger cars with a typical flow rate of 35 L/min; assuming gasoline (34 MJ/L) this yields of chemical energy flow of 19.8 MW (for comparison: each of the 4 reactors at CNPE Cattenom has a nominal electrical output of +/- 1300 MW). Technically there are possibilities to go to higher power without endangering the battery; this is generally referred to as fast-charging. Estimates of “adding 100 km in 10 minutes” have been brought forward. Contrary to “conventional” methods however, fast-charging requires sophisticated charging stations that – given the high power flow – need to be individually integrated into the electric distribution network (including the installation of a dedicated line). This makes fast-charging too expensive for individuals, but it could play an important role in the public charging infrastructure e.g. at motorway service areas.

Indeed a dense network of strategically placed fast charging stations could alleviate the range problem: for daily driving, having a full battery just a 15 minutes fast-charge away at the next station around the corner might be the break-through for electric mobility. Charging could still occur primarily at home, but in case of emergency one would

stay mobile. And for the occasional long distance trip, the range could be extended with intermediate stops at charging stations along the way. Unfortunately, such a network does not exist today and when (or if) it starts to grow, it will take many years to mature.

So at least for now, BEVs are stuck with low autonomy ranges due to the tight limitation of the on-board energy reserve. This is an inherent property of BEVs that cannot be overcome, but it can be dealt with: “smart” energy management systems could e.g. suggest lowering the interior temperature by a few degrees or maybe propose an alternate route to still reach the desired destination. Even more advanced systems could communicate with the local electricity provider and e.g. take the driver to the next free public charging station.

Still for this to make any sense, customers must first accept this new kind of mobility, where occasionally user comfort must be sacrificed for the sake of staying mobile. Increasing energy prices and stagnating urban traffic flows might facilitate this transition, but some rethinking is necessary.

### Hybrid electric vehicle

Another solution to the problems of all-electric mobility might be hybrid electric vehicles (HEV). The concept is simple: by combining the high energy density of liquid hydrocarbon fuels with the high efficiency of an electric powertrain, one hopes to overcome the range issues of BEVs while profiting from the high efficiency of electric motors.

Again, the idea of building hybrids is not new: back when combustion engines, clutches and variable transmission gears were immature technologies, vehicle designers added electric propulsion systems as a “limp home mode”. And at the beginning of the 20th century, Ferdinand Porsche himself, in an attempt to overcome the low energy capacity of lead-acid batteries, presented his “Mixte-Wagen” which is generally considered the world’s first series hybrid.

Today’s hybrids are much more complex machines whose implementation is quite a challenge. On one hand, a high-voltage power circuit must be added to the vehicle; a bulky

battery and one (or several) electric motor(s) (that all generate waste heat) must fit into an already tight packaging. To control the electric powerflow, reliable and yet affordable power electronics are required; and once all that hardware has been assembled in an efficient, mass-produceable design a control algorithm, a so called energy management strategy, must be devised.

In fact, from a control engineering point of view, "hybridizing" a CV adds one additional degree of freedom to the system: the choice of whether to drive electrically or "chemically" using the ICE. This decision is crucial for overall efficiency since compared to the CV, the additional electric components make the HEV heavier and therefore less efficient to begin with. The reduction in fuel consumption is only achieved by appropriately balancing all-electric driving with phases of brake energy recuperation and ICE usage. This leads to a multi-objective control problem, that must not only minimize energy demand but also respect component limitations and maximize battery life.

With a good strategy, fuel consumption can be reduced from 10% to 30% but compared to BEVs, this is still inefficient. To really profit from the electric subsystem in a HEV, a particular configuration, the so called "plug-in hybrids" are interesting: in a nutshell, plug-in hybrids are HEVs with a "supersized" battery that can be charged on grid electricity. The degree of electrification is variable: on one end, HEVs with slightly increased battery capacity can achieve much better fuel economy by drawing some power from the electric grid. On the other end of the spectrum are the so called "range-extendors", i.e. primarily electric vehicles equipped with a so called auxiliary power unit. This is usually an ICE, directly coupled to a generator. Upon battery depletion the aggregate provides the electrical power for the electric motors at the wheels, until finally the on-board fuel tank runs dry too.

With the Chevrolet Volt and the Opel Ampera, two commercial vehicles of this design were introduced to the global market. They could play an important step in the future as bridge-technology since they essentially are BEVs, with the

range of a CV and this independently of a public charging infrastructure.

It should be noted that hybrids have limitations. While highly transient inner-city stop-and-go traffic results in very good fuel economy, rather uniform long distance motorway journeys usually result in quite bad mileage. The prolonged high load phases quickly drain the battery, at which point the ICE has to take over. Still, the energy management system must replenish the battery, because electric power could be required at any time. This results in a cyclic usage of both combustion and electric powertrains. While this is what usually makes a HEV more efficient than a CV, in this case, the combination of low amplitudes and high frequencies cause high ohmic losses so that there is not much efficiency to gain from using the electrical subsystem. At this point, the electrical components are essentially excess weight, increasing the car's rolling resistance and inertial mass. This is why - under the described conditions - a state of the art, highly efficient conventional Diesel powertrain can outperform the HEV.

A consequence of this is that future vehicles probably will no longer be "all-rounders" as the CVs we are used to as some powertrains are better suited for a specific usage case as others. Long-distance commuter might prefer highly efficient CVs, whereas city-dwellers will have lower "fuel" costs with a BEV or maybe a range-extender.

### **A word about hydrogen**

Some years ago, there was high hopes for using hydrogen as an energy-vector for individual mobility. Indeed, with a lower heating value of 121 MJ/kg hydrogen combustion provides nearly three times the energy per kilogram as gasoline. And when "burned" in a fuel cell, electricity can be obtained very efficiently (as fuel cells are not Carnot limited) essentially making batteries obsolete.

Unfortunately, hydrogen will probably not be the revolutionary fuel of the future that it was expected to be, despite all its excellent qualities. All technical issues such as how to safely store hydrogen on a moving vehicle aside, hydrogen

is “just” an energy carrier meaning it has to be generated first. When this is to be done in a sustainable manner, high-temperature electrolysis (splitting hot water molecules into oxygen and hydrogen) is the method of choice. The efficiency of this process is somewhere within 50% to 80%. Next, the gas has to be pressurized (or liquified) which again consumes a lot of power. Thus compared to electric transmission, the hydrogen supply chain is inefficient; depending on the source, each electrical unit gained at a fuel cell requires 2 to 3 times the electrical input at the beginning of the supply chain. In other words, starting with the same electricity source, up to 3 BEVs can travel the same distance as one fuel-cell vehicle.

### Conclusion and Outlook

The American National Academy of Engineering elected electrification and the automobile the most important engineering achievements of the 20th century. Both technologies changed the face of the world. After more than a century of walking close, parallel paths they will finally be brought together and hopefully lead to a sustainable future for individual mobility.

It is difficult to predict how this future is going to look. The choice for a given vehicle model is not only affected by technological arguments like presented in this document, but also socio-economic components that are almost impossible to capture as an individual's affinity for an automobile is very often not rational.

From a system-analyst's point of view however, it is not only the development of the automotive industry that must be monitored. If electrification is the goal, then the electric power generation industry must evolve towards sustainable technologies too.

However, in the end, it is up to the public to decide whether CO<sub>2</sub> neutrality, sustainability or energy costs should be the driving factor.

Gil Georges

**Gil Georges** received his Master's Degree in Mechanical Engineering from ETH Zurich in 2010. Since then he is a Ph. D. student with the Aerothermochemistry and Combustion systems Laboratory (LAV, group of Prof. Boulouchos) at the Institute for Energy Technology, ETH Zurich.

His research consists of the technology assessment of new drivetrain technologies on a transport-system level. By means of large-scale vehicle simulations, the entire current and foreseeable future fleet (in terms of vehicle shapes and powertrain configurations) is investigated to predict the performance, operation costs, primary energy demand and total emission levels under various traffic conditions and varying driver behavior.

Gil's dissertation is embedded in THELMA project <[www.thelma-emobility.net](http://www.thelma-emobility.net)>, investigating the impact of drivetrain electrification on Switzerland as a whole.

Gil Georges  
MSc ETH ME, PhD Student  
ETH Zürich, Institut für Energietechnik (IET)

Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV)

[1] B. Kumar, J. Kumar, R. Leese, J.P. Fellner, S.J. Rodrigues, K.M. Abraham, A Solid-State, Rechargeable, Long Cycle Life Lithium-Air Battery, Journal Of The Electrochemical Society. 157 (2010) A50.





# Innovons ensemble !

Organisation et gestion des entreprises | Technologies de la santé

Technologies environnementales | Technologies des matériaux

Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)

Découvrez nos formules  
de collaboration sur  
[www.tudor.lu/collaboration](http://www.tudor.lu/collaboration)

**tudor**  
PUBLIC RESEARCH CENTRE HENRI TUDOR

This paper provides information on the energy consumption structure of four supermarket refrigeration systems of different configurations in Luxembourg. The distribution of the energy consumption between 7 components (cabinets, compressors, fans, pumps, etc.) in relation to the total energy consumption is presented and discussed here. This data will allow energy auditors who have access to the total electricity consumption of a supermarket, to estimate the distribution of the energy consumption to individual components. Furthermore, the full load hours of the main components are calculated here as a support for energy consumption estimations of similar systems.



Paper first published in the proceedings of the 7th biennial international workshop Advances in Energy Studies, October 19-22, 2010, Barcelona, Spain

# ENERGY CONSUMPTION ASSESSMENT OF DIFFERENT SUPERMARKET REFRIGERATION CONFIGURATIONS\_

A. Bertrand, D. Koster

Electricity prices for industry in the EU-27 increased by 42% over the period of 2005 to 2009 [Eurostat, 2010]. As such, more and more companies consider Life Cycle Costs (LCC), which estimates, amongst others, the costs occurring by the use of a process, as a criterion for their decision-taking procedures when considering buying new equipment. For the optimisation of existing equipment, the companies are conducting energy audits, which define and assess improvement measures to reduce their energy consumption. In both cases of assessing new and existing equipment, energy consumption must be estimated, as measured data are (generally) not available.

The problem with energy consumption estimations is that they are often not accurate. For example, an internal project comparing the energy consumption estimations (heat and electricity) of 3 sites with their real, measured, energy consumption, showed that the estimated values were varying between - 173% and + 58%, the best match being an overestimation of 9% of the heat consumption of one of the sites. These large deviations are not necessarily due to poor work, but because it is difficult to estimate the energy consumption of variable load systems. In the past, energy consumption estimations were performed considering either a constant functioning (in term of power and time) of the component, or a staged functioning for a specific period of time. Nowadays, systems are not operating on a constant basis, so their power use varies considerably over time. This variability is making it difficult to estimate the average functioning time, and therefore the energy consumption, of technical components.

The objective of this paper is to improve the quality of energy audits of supermarkets by providing information on the energy consumption structure of four different refrigeration systems. This data was obtained during a measurement campaign of one year in the framework of the ANIA-project (ANalyses et gestion des impacts environnementaux et de la consommation énergétique d'Installations frigorifiques dans le secteur Agro-alimentaire) [Bertrand, Koster, 2008]. More specifically, the distribution of the energy consumption between 7 components (cabinets, compressors, fans, pumps) in relation to the total supermarket electricity consumption

is presented and discussed here. This data will allow energy auditors who have access to the total electricity consumption of a supermarket, to estimate the distribution of the energy consumption to individual components. When available, values from similar studies are included to support the presented data. Furthermore, the full load hours of the main components are calculated here as a support for energy consumption estimations of similar systems.

## SYSTEM DESCRIPTION

The four refrigeration systems assessed are installed in supermarkets in the towns of Ettelbrück, Brill, Bettembourg and Echternach (Luxembourg). The positive cooling systems (around -10°C evaporation temperature) of the first two supermarkets are equipped with direct evaporation systems (except for the air-conditioning – ac – unit of the supermarket in Brill, which is indirect), while the last two have an indirect (using propylene glycol) evaporation system for their positive cooling. The negative cooling (around -38°C evaporation temperature) system in Ettelbrück is autonomous, sharing the same (indirect) dry cooler as the positive cooling system. The negative cooling systems of the other 3 supermarkets consist of two-stage systems, which means that their condensation is not achieved via the dry cooler of the system, but via a heat exchanger coupled to the cold side of the positive cooling system. For all supermarkets, the condensation of positive cooling is achieved indirectly via dry coolers. The refrigeration systems in Brill and Echternach have both two indirect condensation circuits, so that two pump groups are used on these sites. The refrigeration is used for cabinets and cold rooms, as well as for air-conditioning, in the case of Brill and Echternach. An overview of the major parameters of the four systems is given in table 1.

The positive cooling compressors of Ettelbrück and Bettembourg, as well as one compressor from Brill, are controlled via a bypass of the pistons. The other compressors are controlled via an on/off control. The evaporation temperature of the positive cooling systems in Bettembourg and Echternach is raised by 3,4K during the nights, and 2,1K on days that the supermarkets were closed. The condensation temperature was relatively constant for Ettelbrück, while

Parameter	Ettelbrück	Brill	Bettembourg	Echternach
Positive cooling power [kW]	67	183	68	169
Positive electrical power [kW]	25	83	30	72
Evaporation temperature [°C]	-10	-13,5	-14	-12
Positive evaporation system [-]	direct	direct	indirect	indirect
Positive cooling refrigerant [-]	R134a	R134a	R134a	R134a
Electrical power of the indirect evaporation pumps [kW]	-	2,0/2,0 (ac)	2,2	3,0/4,0
Negative cooling power [kW]	22	28	16	29
Negative electrical power [kW]	16	10	5	10

table 1\_refrigeration systems description

Parameter	Ettelbrück	Brill	Bettembourg	Echternach
Evaporation temperature [°C]	-38	-37	-38	-37
Negative evaporation system [-]	Stand-alone	2-stage	2-stage	2-stage
Negative cooling refrigerant [-]	R404A	R744 (CO <sub>2</sub> )	R744 (CO <sub>2</sub> )	R744 (CO <sub>2</sub> )
Electrical power of the dry cooler pumps [kW]	4,0	7,5	2,2	7,5
Electrical power of dry cooler fans [kW]	16,00	3,20	1,10	6,00

table 2\_refrigeration systems description (continued)

the temperatures of the other sites were slightly adapted according to the external temperature, as is illustrated in figure 1 (the data gap for the site in Ettelbrück is due to data acquisition problems).

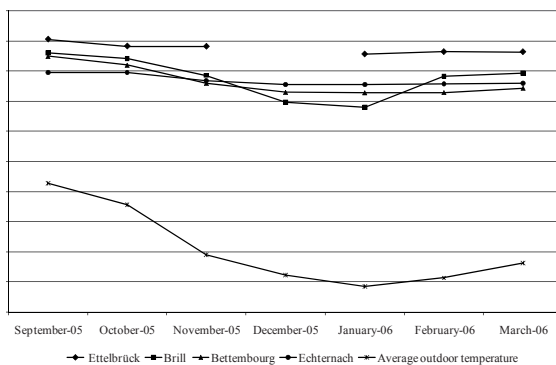


figure 1\_average condensation temperatures and outdoor temperature

The pumps of the indirect evaporation and condensation circuits use an on/off control and are therefore running at a constant power level. The fans of the dry coolers switch on or off one at the time, as a function of the circuit temperature. Except for the site in Ettelbrück, heat recovery is used for hot water and air preheating. The positive indirect cooling systems are equipped with liquid suction heat exchangers. These heat exchangers are mostly used to protect the compressors against liquid inflows, as well as to obtain a subcooling of about 20 K to raise the thermal power (and thus improve the Coefficient Of Power – COP – of the system). For further details on the systems, see [Bertrand, Koster, 2008].

## ENERGY CONSUMPTION AND CO<sub>2</sub>-EMISSIONS OF THE CONSIDERED SYSTEMS

### Measurement campaign

The measurement campaign started the 1th of April, 2005 and finished the 31st of March, 2006. Energy consumption data of the dry coolers, the compressor unit (positive and negative cooling), the pumps (evaporation and condensation side) and of the different cooled items (cabinets and

frozen rooms), as well as of the total refrigeration energy consumption was gathered using MDVH3106 / DVH3113 counters. For the period between April and August 2005, the values of the energy counters were collected on a monthly basis. Due to an adaptation of the measurement equipment, the data acquired during the period from September 2005 to March 2006 was downloaded from a central digital data acquisition system.

The average outdoor air temperature and relative humidity over the period considered are represented in the figure below.

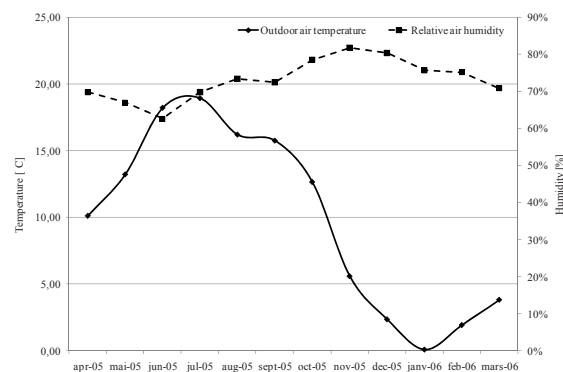


figure 2\_monthly average outdoor air temperatures and relative air humidity [Massen, 2006]

### Energy consumption distribution

The different relative energy consumptions are given in table 3. The percentages are related to the total supermarket electricity consumption.

The energy consumption of the refrigeration systems represented more than 60% of the total electricity consumption of the supermarket. In Brill, this value even reached 86%, which is due to the partial use of the cooling equipment for air conditioning and the use of an ice machine. This higher contribution to the total electricity consumption is probably also due to the fact that the supermarket was newly build and used several energy-saving measures (e.g. concerning lightning). A value of 47% is mentioned for medium and low outdoor air temperatures in relation to supermarkets in

	<i>Ettelbrück</i>	<i>Brill</i>	<i>Bettembourg</i>	<i>Echternach</i>
Total supermarket electricity consumption [kWh/a]	703 570	809 804	354 870	1 381 536
Total measured refrigeration energy consumption [kWh/a]	431 309	694 654	227 328	833 950
Relative measured refrigeration energy consumption [%]	61%	86%	64%	60%
Sum of the refrigeration components energy consumption [kWh/a]	422 142	599 255	212 922	815 106
Dry cooler fans [%]	4,5%	0,4%	0,4%	0,7%
Negative cooling compressor unit [%]	16,0%	5,2%	5,3%	4,4%
Positive cooling compressor unit[%]	15,2%	39,6%	26,5%	26,4%
Sum of positive and negative compressor units [%]	31,2%	44,7%	31,9%	30,8%
Negative cooling items[%]	13,7%	15,2%	11,3%	10,2%
Positive cooling items [%]	6,3%	4,4%	8,3%	10,5%
Sum of positive and negative cooling items [%]	20,0%	19,6%	19,6%	20,7%
Condensation pumps [%]	4,3%	6,7%	4,2%	3,3%
Evaporation pumps [%]	-	2,6%	3,9%	3,5%

table 3\_relative energy consumption distribution

Sweden by Baxter,(2003), 56% for a supermarket in France (measurement campaign over 6 months) [Enertech, 2001], 44% for a direct evaporation supermarket and 58% for an indirect evaporation supermarket in California (values based on average daily energy from October 2002 to June 2003) [Faramarzi R., Walker D., 2004].

#### Dry cooler fans

The energy consumption of the dry cooler fans in the supermarkets in Brill, Bettembourg and Echternach is almost negligible. The reason for this very small energy consumption is that the heat exchange surfaces are very important for these sites, and as the heat transferred is proportional to the surface as well as the mass flow, the latter can be reduced, thus diminishing the energy use of the fans. The energy consumption of the fans in Ettelbrück, on the other hand, is about 4,5% of the total supermarket electricity. From table 4, it is clear that in Ettelbrück, the specific heat exchange is 2 to 3 times smaller than those of the other supermarkets, which is due to limited available space. For this reason, the specific power is about 23 times more important. The absence of heat recovery as well as the indoor installation and the necessity for noise abatement measures are further reasons for the increased energy consumption.

The contributions of the energy consumption of the condenser of a direct, respectively indirect evaporation system in California in relation to the total energy consumption of the supermarkets were 3% and 4% [Faramarzi R., Walker D., 2004].

The full load hours of the fans of the considered systems are as follow:

If these values are to be used for an estimation of the energy consumption of a supermarket refrigeration system, it is advised to choose the appropriate value according to the above-mentioned description of the dry cooler system. The most relevant aspects to consider for the choice of the value are presence of heat recovery and heat exchanger surface.

#### Compressors

The energy consumption of the compressors (total of positive and negative cooling compressors) represents about 31% of the total supermarket electricity consumption. In

the case of Brill, the compressors consumed as much as 45% of the total energy used, which is probably linked to the additional functionality due to the air-conditioning support. A measurement campaign of 2 supermarkets in California showed that, when related to the daily energy consumption, the compressors represented 30% for the direct evaporation system and 33% for the indirect configuration [Faramarzi R., Walker D., 2004].

The energy consumption of the positive cooling compressors of Bettembourg and Echternach represented about 27% of the total electricity consumption, while the compressors of Brill reached 40%. The negative cooling compressors of these sites contributed only to 5% to the energy use of the supermarket. For the stand-alone system in Ettelbrück, the positive cooling compressors used 15% and the negative cooling compressors 16% of the total energy. This difference between stand-alone and 2-stage configuration is due to the fact that the work needed to compress the refrigerant from a temperature level of -10°C to the condensation temperature is taken over by the positive cooling system for the 2-stage configuration (thereby reducing the energy consumption of the negative cooling compressors). This compression work is produced by the negative cooling compressors of the stand-alone system, therefore reducing the energy consumption of the positive cooling compressors.

With regards to the potential efficiency losses of indirect cooling systems due to lower evaporation temperature (linked to the difference of temperature necessary for the heat exchanger, see for example [Clodic et al., 1998]), it is interesting to note that this effect was avoided by the use of the internal liquid-suction heat exchanger. This heat exchanger allows the superheating of the exiting refrigerant, leading to an increased heat exchange surface (as the superheating is not done in the normal heat exchanger anymore) and thus enabling a higher evaporation temperature. Without this heat exchanger, according to the manufacturer, the evaporation temperature would be about 3K lower, which would lead to a reduction in efficiency at full load of approximately 6%-7,5% [Renz, 2003]. Further information on the energy efficiencies of the compressors can be found in Bertrand and Koster (2008).



<i>Parameter</i>	<i>Ettelbrück</i>	<i>Brill</i>	<i>Bettembourg</i>	<i>Echternach</i>
Thermal power [ $\text{kW}_{\text{th}}$ ]	70	300	96	224
Specific power [ $\text{W}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{th}}$ ]	229	11	12	27
Heat exchange surface [ $\text{m}^2$ ]	309	4 028	1 427	2 138
Specific heat exchange surface [ $\text{m}^2/\text{kW}_{\text{th}}$ ]	4,41	13,43	14,86	9,54

table 4\_data on the heat exchange surface and specific power of the dry coolers

	<i>Ettelbrück</i>	<i>Brill</i>	<i>Bettembourg</i>	<i>Echternach</i>
Dry cooler fans [hrs]	1964	893	1320	1593

table 5\_full load hours of dry cooler fans

The full load hours of the compressors are given in table 6.

The choice of the full load hours for energy consumption estimations should be based on the configuration of the positive and negative cooling systems (e.g. values from Ettelbrück for stand-alone configuration). The higher full load hours of the site in Echternach implies that the compressor units are not, compared to the other supermarkets, oversized. For the production of the necessary cooling, the compressors have therefore to work longer and at high power levels. So, for compressor units working often close to their maximum power level, it might be relevant to use full load hours similar to those obtained in Echternach.

### Cooling items

In this project, 20% of the electricity consumption of the supermarket is related to the electricity use of cabinets and cold storage rooms. The positive cooling cabinets represent between 5% to 11%, the negative cabinets between 10% and 15% of the total electricity consumption. This electricity consumption is due to the use of lighting, fans, electrical defrost heating (direct evaporation circuits), anti-fog heating of the windows, handrails and doors heating and condensate heating (to avoid freezing in the condensate pipe). In [Faramarzi R., Walker D., 2004], these cases represented 12% (direct evaporation) and 18% (indirect evaporation) of the energy consumption.

The energy consumption of the electrical defrost associated with the direct evaporation system of the cabinets of Ettelbrück and Brill were measured separately, and represented 0,5%, respectively 0,7% of the total energy use of the supermarket. Based on confidential information provided by the manufacturer, the specific energy consumption of the electrical defrost system is calculated as attaining  $165 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ , the surface of reference being the total surface of exhibition of a cabinet. The indirect evaporation systems were defrosted by stopping the brine circulation and using the supermarket hotter air, thus avoiding the necessary energy consumption.

The measurement campaign did not provide further information on the distribution of the energy use in accordance

of the other components. A review of energy consumption distributions for different types of cabinets can be found in [Monier V. et al., 2007].

Because of the large number of types and manufacturers, the energy consumption estimation and distribution analysis of the cabinets and storage room is particularly difficult. In certain cases, the cabinet manufacturer have information on the Direct electrical Energy Consumption (DEC) of their equipment, which can be found on the homepage of the Eurovent association [www.eurovent-certification.com](http://www.eurovent-certification.com). Typical DEC values for different kinds of cabinets are given in [Monier V. et al., 2007].

### Pumps

The energy consumption of the constant-flow pumps of the indirect evaporation units were 4%, while the condensation systems represented between 3% and 7% of the total electricity consumption. The value of 3% measured for the air-conditioning of the supermarket in Brill should not be considered, as the system was new and not fully operational at the beginning of the measurement campaign. The pumps represented 3% of the energy consumption of the considered supermarket in [Faramarzi R., Walker D., 2004].

The full load hours of the pumps are given in table 7.

As mentioned above, the pumps are controlled in an on/off mode. As such, the only time when they are not working is when the refrigeration system is not used. Interestingly, the assertion often stated in the framework of energy consumption estimation, that full load hours of the dry coolers and of the condensation pumps should be identical, is not confirmed here. In the case of the evaporation pumps, we would propose to use, as a first approximation, about 6600 hours for pumps similar to those used here. For condensation pumps, the proposed approach for the dry cooler fans would also be of application here.

### Additional equipment consumptions

As can be seen in table 3, the sum of the measured energy consumption of the different components and the total measured energy consumption for the refrigeration

	<i>Ettelbrück</i>	<i>Brill</i>	<i>Bettembourg</i>	<i>Echternach</i>
Negative cooling compressor unit [hrs]	7047	4179	3794	6100
Positive cooling compressor unit [hrs]	4274	3859	3138	5064

table 7: full load hours of pumps

	<i>Ettelbrück</i>	<i>Brill</i>	<i>Bettembourg</i>	<i>Echternach</i>
Condensation pumps [hrs]	7619	7254	6806	6100
Evaporation pumps [hrs]	-	5217	6247	6966

table 6: full load hours of compressors

system differs by 2% in Ettelbrück and Echternach, 7% in Bettembourg and 16% in Brill. This supplementary energy consumption is due to additional equipment, like the centralised control system, the fans of the electricity cabinets and of the equipment rooms. In Bettembourg, the higher energy consumption, compared to Ettelbrück and Echternach, is most probably due to the use of a compressed air system for the control of pneumatic valves. In Brill, the high additional energy consumption is due to an ice machine necessary for the fish display cabinets. Considering this aspect, future energy consumption measurement campaign should try to assess separately the energy use of such a unit, as it is, in this case, consuming more energy than the fans of the dry cooler or the pumps.

Based on the data presented here, we would propose to consider an additional 2% in energy consumption which takes into account the basic components mentioned above: the centralised control system and several small fans.

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The contribution of the energy consumption of different components of the refrigeration systems in four supermarkets in relation to the total electricity consumption are presented in this paper. Results from similar studies are mentioned and show that the values obtained are of a corresponding magnitude. As such, energy auditors assessing refrigeration system of similar configuration and use, have, in this paper, an overview of the importance of the different components and their contribution to the energy consumption of a supermarket. Using the data provided, energy optimisation measures can be better prioritised.

Based on the measured energy consumption, the full load hour values of different components analysed in this paper are given here. The variations in values between the four considered sites show that the definition of only one, commonly applicable, full load hour is not feasible. This is due to differences in user behaviour, system configuration and component behaviour and control. Therefore, the values mentioned in this paper should be used as a guide only, when considering the energy consumption estimation of similar systems, in terms of technology and use.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The project was co-financed by the supermarket group Cactus S.A., the Environmental Agency and the Ministry of Higher Education and Research of Luxembourg. This paper is co-financed by the European FP6-project SEMS – Sustainable Energy Management Systems, contract number 038514 and the Ministry of Higher Education and Research of Luxembourg.

## References

- Baxter V. (compiler), IEA annex 26: advanced supermarket refrigeration / heat recovery systems – final report volume 1 – executive summary, [http://www.ornl.gov/sci/engineering\\_science\\_technology/Annex26/Annex-26-final-report.pdf](http://www.ornl.gov/sci/engineering_science_technology/Annex26/Annex-26-final-report.pdf), Oak Ridge National Laboratory, 2003
- Bertrand A., Koster D., ANIA - Analyses et gestion des impacts environnementaux et de la consommation énergétique d'installations frigorifiques dans le secteur agro-alimentaire – rapport final, [http://www.crte.lu/cms/crte/content.nsf/0/CB023779A8F6499AC12575600052FB40/\\$file/Ania\\_Rapport\\_final-1.0.pdf](http://www.crte.lu/cms/crte/content.nsf/0/CB023779A8F6499AC12575600052FB40/$file/Ania_Rapport_final-1.0.pdf), Resource Centre for Environmental Technologies, 2008
- Clodic D., Le Pellec C., Darbord I., Efficacité énergétique de systèmes direct et indirect en froid commercial – étude comparative, Journée Française du Froid, Association Française du Froid, 1998
- Enertech, Diagnostic électrique d'un supermarché de moyenne surface – rapport final, <http://sidler.club.fr/RSuperm.PDF>, Enertech, 2001
- Eurostat, Electricity prices for industrial consumers (ten00114), [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main\\_tables#](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables#), Eurostat database, 2010
- Faramarzi R., Walker D., Investigation of secondary loop supermarket refrigeration systems, [http://www.energy.ca.gov/reports/2004-04-23\\_500-04-013.PDF](http://www.energy.ca.gov/reports/2004-04-23_500-04-013.PDF), California Energy Commission, 2004
- Massen F, Meteorological data of the Lycée Classique in Diekirch, <http://meteo.lcd.lu/>, Lycée Classique Diekirch, 2006
- Monier V., Mudgal S., Iyama S., Tinetti B., Preparatory studies for eco-design requirements of EuPs – Lot 12 : commercial refrigerators and freezer (final report), [http://www.ecofreezer.com/org/docs/BIO\\_EuP\\_Lot\\_12\\_Final\\_Report.pdf](http://www.ecofreezer.com/org/docs/BIO_EuP_Lot_12_Final_Report.pdf), BIO intelligence service, 2007
- Renz H., Anwendung von alternativen Kältemitteln aus Sicht eines Verdichtsherstellers – Besonderheiten, Anforderungen, [www.bitzer.de/\\_doc/download.php?d=a&f=av-0301-de.pdf](http://www.bitzer.de/_doc/download.php?d=a&f=av-0301-de.pdf), Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, 2003

# CAHIER SCIENTIFIQUE REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

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

Revue Technique Cahier Scientifique	4 ex. par an 2 ex. par an
Coordonnées	
Nom	
Prénom	
Adresse	
Lieu	
Email	
Date  Signature	

Merci de bien vouloir régler votre facture sur un le comptes auprès de:

Banque de Luxembourg: BIC BLUXLULL IBAN LU14 0080 1974 0200 2001

**Dates de parution:** [www.revue-technique.lu](http://www.revue-technique.lu)

**No. 1 = mars      No. 2 = juin      No. 3 = 30 septembre      No. 4 = 31 décembre**  
Toujours à la fin du mois

***Pour tout complément d'information, veuillez-vous adresser à notre responsable:***

**Sonja Reichert      Tél. : 26 11 46 42      e-mail : [revue@aliai.lu](mailto:revue@aliai.lu)**



POSTDOC NEXT DEADLINES:  
14.09.2011 – PHD 05.10.2011

## 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**. 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 its PhD or Postdoc training? Go and see what's behind on [www.afr.lu/ppp](http://www.afr.lu/ppp) or send an email to [afr@fnr.lu](mailto:afr@fnr.lu)

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



aides à la  
formation  
recherche



Fonds National de la  
Recherche Luxembourg

INVESTIGATING FUTURE CHALLENGES