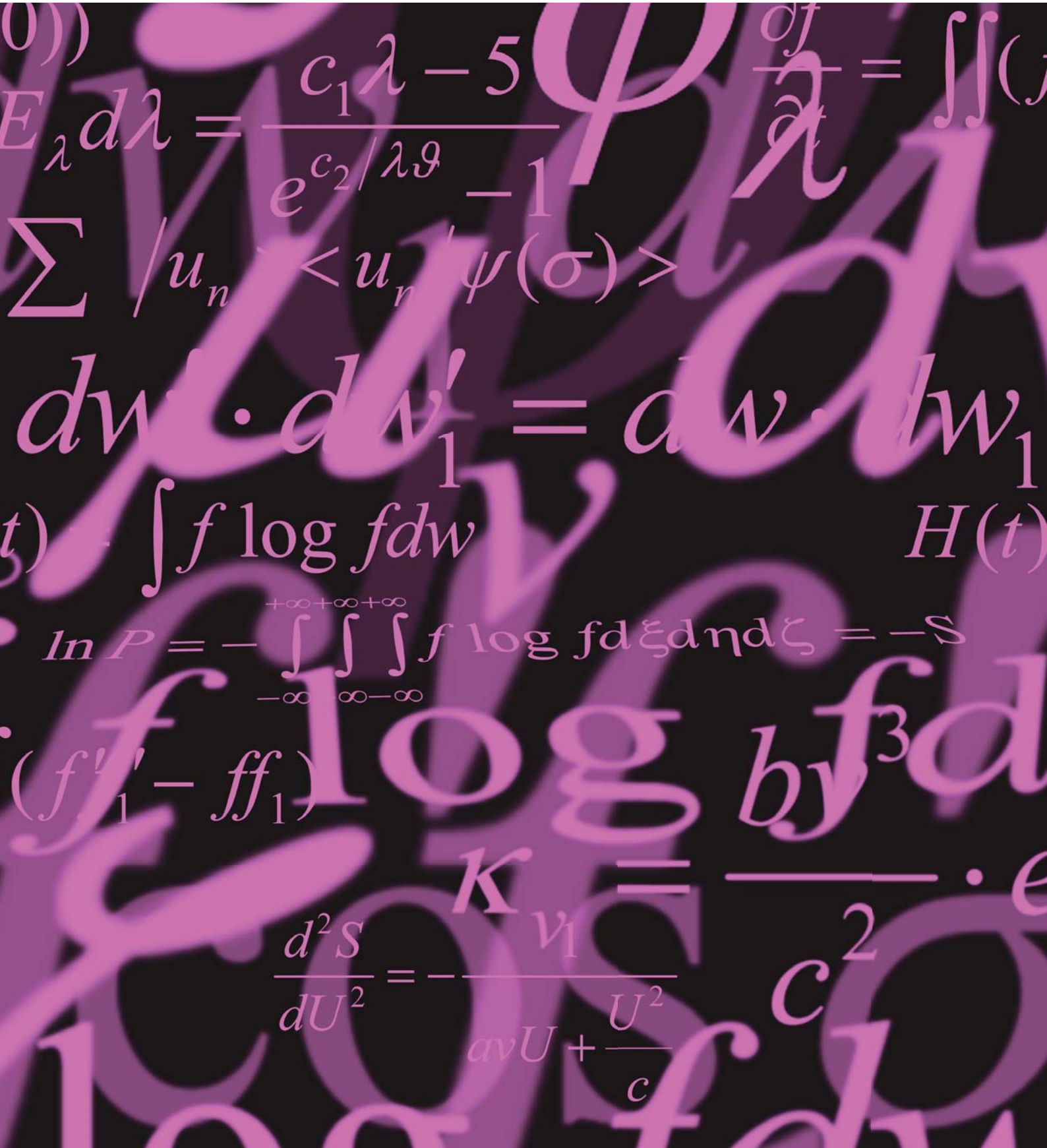


CAHIER SCIENTIFIQUE REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

CAHIER SCIENTIFIQUE BIANNUEL DE LA REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE 1 | 2010



L'ALIAI édite depuis 1908 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

revue trimestrielle 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
Graphisme Bohumil Kostohryz

EDITO_

Chers lecteurs,

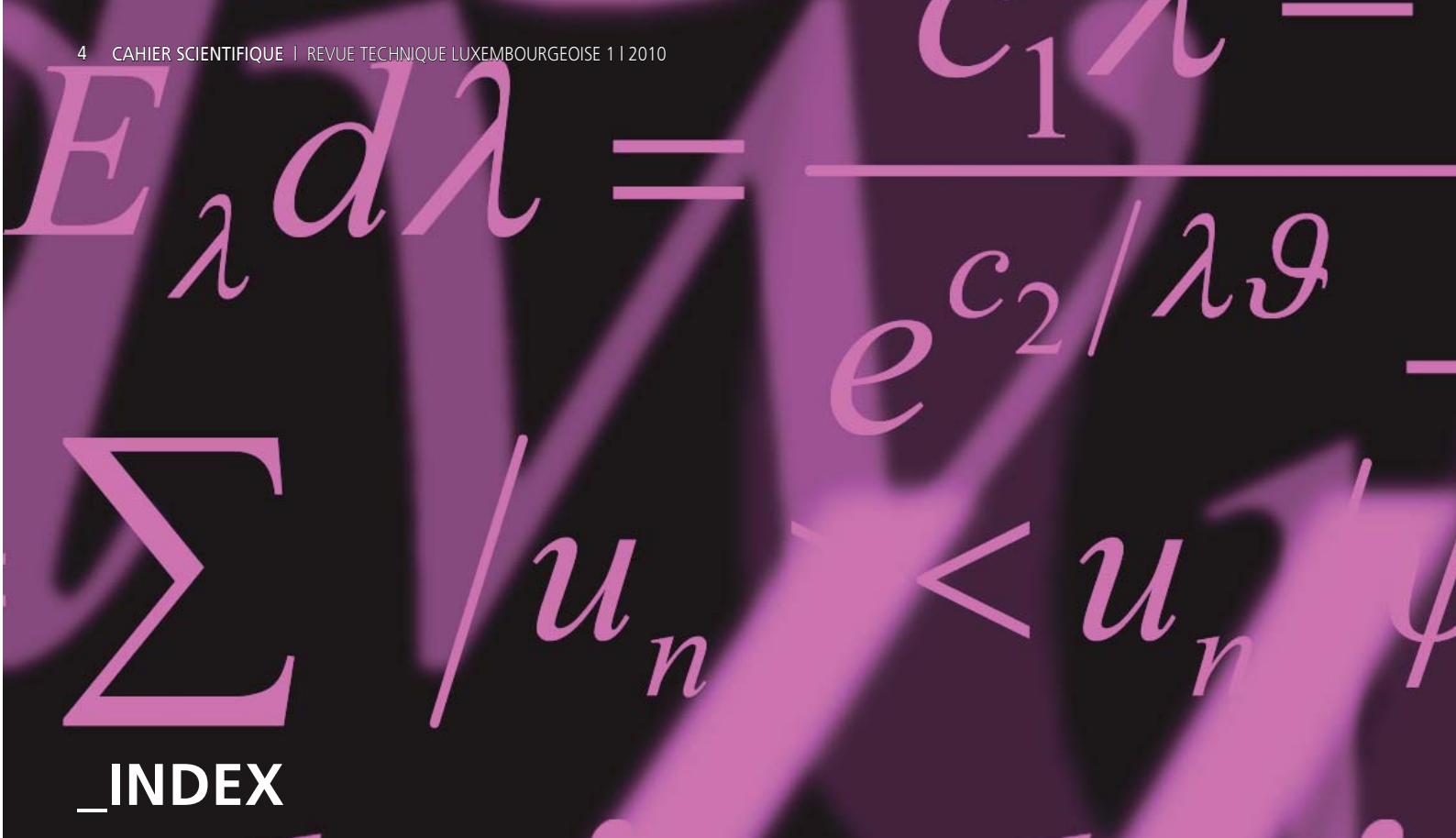
Le Fonds National de la Recherche (FNR) poursuit trois objectifs: soutenir les chercheurs afin de développer la qualité et l'excellence scientifiques, améliorer l'environnement de recherche luxembourgeois et promouvoir la culture scientifique.

Ce troisième objectif nous tient particulièrement à cœur: pour valoriser la recherche et les chercheurs, il faut communiquer les résultats de la recherche, les rendre visibles à un niveau national et international, et ceci tout autant auprès du grand public qu'auprès de la communauté de la recherche. En ce qui concerne la communication entre les chercheurs, le FNR tient à ce que les chercheurs financés par un de ses programmes publient leurs résultats dans les journaux les plus réputés. Le grand public, quant à lui, est touché grâce à des articles sur des chercheurs ou des projets de recherche qui, sur base d'un partenariat, paraissent régulièrement dans le Luxemburger Wort et la Voix. Il ne manquait plus que la cible du public avisé. Chose est faite avec les Cahiers Scientifiques de la Revue Technique, soutenus par le FNR.

Nous souhaitons beaucoup de succès à cette publication, dont vous tenez en main la première édition, et qui permet aux chercheurs luxembourgeois de communiquer avec un public avisé – ingénieurs, architectes, industriels – au Grand-Duché et au-delà des frontières.

Bonne lecture,

Raymond Bausch
Secrétaire Général
Fonds National de la Recherche



- 6_ VARIATIONS DES PERFORMANCES CHEZ DES SALARIES TRAVAILLANT EN HORAIRES DECALES
Prof. Claudine Mélan
- 11_ 24ème Foire de l'Etudiant
- 12_ FLACHDECKEN AUS STAHLFASERBETON
Dr. Julien Michels
- 16_ TARGETING SALES
Ing. dipl. Henri Muller
- 20_ ZUR VORGESCHICHTE DER QUANTEN THEORIE. BOLTZMANN, PLANCK UND DAS H-THEOREM
Ing. dipl. Prosper Schroeder
- 34_ FIRE PREVENTION IN EUROPE
Olga Mala, Dr. Siemon Smid, Igor Mysevych
- 42_ MANUFACTURING EXECUTION SYSTEMS
Informaticien dipl. Benjamin Klamerek, Informaticien dipl. Patrick Hitzelberger, Ing. dipl. Fernand Feltz
- 50_ BIOLUX NETWORK - CONNECTING RESEARCHERS
Julia Kessler & Nancy Gerloff

_comité de lecture

Dr. Pierre Gallego
Association Jeunes Scientifiques Luxembourg (AJSL)

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

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

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

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

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

André Baldauff
Membre du comité de Rédaction de la Revue Technique

© Bohumil KOSTOHRÝZ | boshua

publiée par_



www.ali.lu



www.oai.lu



www.tema.lu

A.L.I.A.I.

Association Luxembourgeoise des Ingénieurs, Architectes et Industriels

www.aliai.lu

Le Cahier Scientifique est publié avec le soutien et en coopération avec le_



partenaires de la revue_



PAUL WURTH



GEBERIT



revue imprimée sur du papier_



Sources Mixtes
Groupe de produits issu de forêts bien
gérées et d'autres sources contrôlées.
www.fsc.org Cert no. EUR-COC-051203
© 1996 Forest Stewardship Council

L'objectif de cet article est de spécifier la nature et l'étendue des fluctuations des performances au travail sur la journée de 24 heures. Certains secteurs professionnels pratiquent en effet des horaires de travail atypiques, c'est à dire tôt le matin, tard le soir et/ou la nuit. C'est le cas en particulier du secteur de production industriel (verre, papier, automobile...), l'agro-alimentaire, mais également du secteur tertiaire (santé, transport, petite distribution, sécurité...). Or, en dehors de toute activité professionnelle ou autre, le fonctionnement biologique et psychologique de l'être humain suit des fluctuations régulières, se répétant toutes les 24 heures, décrivant ainsi un rythme circadien. Celui-ci se manifeste par une activation des paramètres (physiologiques, telle que l'activité nerveuse, et psychologiques, telles que les mesures de performance) le jour, contrastant avec un ralentissement la nuit.

VARIATIONS DES PERFORMANCES CHEZ DES SALARIÉS TRAVAILLANT EN HORAIRES DÉCALÉS

Les développements théoriques dans ce domaine sont basés sur des données recueillies dans des études menées en laboratoire, situation permettant de contrôler aussi bien les conditions de passation (bruit, lumière, ...) que de sélectionner les participants en fonction de critères précis (âge, sexe, niveau d'étude,...). Les principaux résultats de ces études expérimentales et les modèles théoriques auxquels ils ont donné lieu seront résumés brièvement, avant d'aborder les études réalisées en situation de travail.

1. Variations circadiennes des performances en situation contrôlée

A partir des années 1930, Kleitman étudie, en situation contrôlée en laboratoire, les rapports entre les variations circadiennes de l'état fonctionnel de volontaires et leurs performances dans des épreuves variées. Il propose l'hypothèse d'une relation simple et directe entre les fluctuations des performances au cours des 24 heures et celles observées pour des indicateurs de l'état fonctionnel des sujets, correspondant le plus souvent à leur température corporelle. Il montre que dans des épreuves simples, notamment de barrage de lettres (barrer des lettres-cibles sur une feuille remplie de lignes de lettres qui se suivent au hasard), ou de détection de cibles (le sujet doit appuyer sur une touche dès qu'un stimulus-cible apparaît), les performances sont minimales la nuit, augmentent progressivement en cours de matinée pour atteindre un maximum en début de soirée, tout comme c'est le cas pour la température corporelle. Selon l'auteur, les variations du niveau d'activité nerveuse, se traduisant par des variations de la température corporelle, seraient directement responsables des variations de performance.

Des travaux réalisés à partir des années 1970 par Simon Folkard et son équipe à l'Université de Swansea, révèlent cependant que le profil journalier des performances varie selon le processus psychologique mis en jeu dans une tâche donnée. Dans une épreuve de barrage de lettres, notamment, l'évolution des performances change sensiblement en fonction du nombre de lettres que le sujet doit barrer. Pour deux lettres, les performances suivent bien la courbe décrite précédemment par Kleitman dans cette tâche, con-

firant ainsi que dans des épreuves reposant principalement sur le niveau d'éveil des sujets, épreuves dites de vigilance, et l'évolution des performances est, dans ce cas, parallèle à celle observée pour la plupart des paramètres physiologiques. En revanche, pour six lettres, les performances évoluent de manière tout à fait différente: elles sont maximales en début de matinée, et diminuent ensuite progressivement en cours de journée. Cette condition diffère de la précédente par l'implication d'une importante charge mnésique puisque les sujets doivent maintenir en mémoire à court terme l'identité des six lettres à repérer.

D'autres travaux ont révélé, par la suite, que dans des épreuves faisant appel à la mémoire, l'évolution circadienne des performances varie en fait selon que la mémoire à court terme (barrage de six lettres, rappel immédiat d'une liste de mots), ou alors la mémoire à long terme (rappel de mots ou d'un texte après un délai d'un ou plusieurs jours) est sollicitée. Dans le premier cas, les performances sont maximales le matin et diminuent ensuite en cours de journée, alors que dans le second cas, les performances sont, au contraire, maximales en fin de journée. Cette évolution différentielle refléterait l'influence du niveau de vigilance sur les processus mnésiques mis en jeu. Un niveau de vigilance faible (c'est à dire le matin) favoriserait des processus automatiques, principalement impliqués dans le traitement à court terme des informations, tels que la répétition mentale d'une liste de mots à restituer après un délai court. L'augmentation de la vigilance en cours de journée interférerait avec ces processus automatiques, mais favoriserait, au contraire, des processus de traitement plus élaborés, impliqués principalement en mémoire à long terme, tels que la restitution d'un texte appris plusieurs jours auparavant.

Finalement, le profil journalier des performances est intermédiaire, avec un pic autour de midi, dans des épreuves sollicitant la mémoire de travail, décrite par Baddeley. Ce système mnésique permet d'effectuer un traitement actif d'informations en mémoire à court terme, notamment dans des épreuves de calcul mental, de raisonnement, de logique etc. Il impliquerait alors à la fois des composantes de traitement en mémoire à court terme et en mémoire à long terme, ce qui expliquerait que le profil journalier des

performances en mémoire de travail soit intermédiaire à celui décrit pour le traitement en mémoire respectivement à court terme et à long terme.

2. Variations des performances en fonction du sommeil et des épreuves utilisées

La baisse nocturne habituelle des performances observée en laboratoire, est accentuée dans les situations de travail impliquant un travail de nuit en continu ou des horaires de travail alternants au cours des 24h. Ce type d'organisation du travail engendre, en plus du creux nocturne habituel, un manque chronique de sommeil - à la fois en termes de quantité et de qualité-, dont les effets néfastes sont particulièrement visibles la nuit (Mélan, 2008). C'est pourquoi, l'évaluation des effets d'une privation de sommeil sur les performances en situation expérimentale, est devenue une approche plus écologique de la question des performances au travail sur la journée de 24 heures.

Des études de privation totale de sommeil pendant 24 ou 48 heures ont rapidement été remplacées par celles introduisant une privation partielle de sommeil de quelques heures, plus proche de ce que peut vivre un opérateur travaillant à des horaires atypiques. Le résultat principal de ces travaux était de montrer que toutes les tâches ne démontrent pas la même sensibilité à une privation de sommeil. Certains auteurs sont ainsi venus à opposer les tâches simples de temps de réaction et d'attention, sensibles à une privation de sommeil, à des tâches plus complexes de raisonnement et de prise de décision, insensibles au même traitement. Selon Wilkinson (1992), des épreuves trop complexes, intéressantes, variées et courtes, inciteraient les sujets à recourir à des stratégies de compensation et d'effectuer ces tâches normalement. La privation de sommeil affecterait le niveau d'éveil non-spécifique et donc le premier type de tâche, mais serait dépourvu d'effets cognitifs spécifiques, mis en jeu dans le second type de tâches. Harrison et Horne (2000) proposent que les effets d'une privation de sommeil ne dépendent pas de la complexité de la tâche en soi, mais de la routine qu'elle implique. Même une tâche complexe, notamment de prise de décision, peut devenir routinière à force de la répéter. En revanche, des épreuves

ou situations qui sollicitent les capacités cognitives du sujet à chaque essai, en empêchant l'application d'une stratégie précise, restent sensibles à une privation de sommeil. Ce serait le cas de situations de test évoluant en permanence (jeu de marketing, ...), sollicitant les capacités d'innovation, d'appréciation du risque, d'anticipation des conséquences, et le maintien d'un intérêt pour l'issue du test.

Bien que des privations expérimentales de sommeil en laboratoire ne reproduisent pas les conditions de sommeil de salariés travaillant en horaires atypiques, ces travaux montrent clairement que les relations entre rythmes biologiques (vigilance) et performances ne sont ni simples ni directes, dès que l'on manipule le facteur sommeil. Dans une revue de question consacrée aux relations entre sommeil et performances, Akerstedt (2007) montre qu'un déficit de sommeil, des durées d'éveil prolongées, ou le fait d'être éveillé pendant la nuit, entraînent une baisse de performance; trois conditions systématiquement et simultanément associées au travail en horaires décalés. L'auteur constate, par ailleurs, que les effets néfastes sur les performances sont plus marqués dans des études menées en laboratoire que dans celles réalisées en situation de travail. Cet écart peut être attribué en particulier à l'absence de contrôle, en situation de travail réel, de multiples facteurs connus pour influencer les performances, tels l'exposition à la lumière et au bruit, la motivation des participants... Malgré cette limitation méthodologique, un certain nombre de travaux rapportent que les performances des salariés sont diminuées au cours du travail posté et du travail de nuit.

3. Fluctuations circadiennes des performances en situation de travail

Nous avons mené plusieurs études de terrain proposant des épreuves expérimentales variées à des horaires spécifiques à travers les 24 heures, auprès de salariés travaillant en horaires décalés. A travers les six points horaires étudiés (03h00, 07h00, 11h00, 15h00, 19h00, 23h00), les performances d'agents de sécurité d'une centrale nucléaire (n=21) étaient stables dans une tâche de poursuite visuelle d'une cible sur un écran (Galy, Mélan, Cariou, 2008). Dans une épreuve de discrimination simple, consistant à indiquer si deux traits

parallèles étaient décalés ou non l'un par rapport à l'autre, les performances étaient diminuées à 03h00 dans la condition la plus difficile (traits décalés de 1 pixel) par rapport aux autres conditions (traits décalés de 0, 2 ou 3 pixels). De même, la figure 1 montre que dans une épreuve de reconnaissance de mots, les performances diminuaient à 03h00, dans la condition difficile (mots lus) par rapport à la condition plus facile (mots entendus ; effet de supériorité auditive).

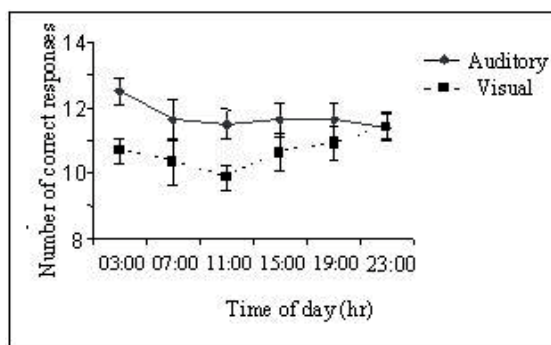


Figure 1 : Nombre moyen de reconnaissances exactes d'un mot-test présenté 5 sec après la présentation initiale d'une liste de 6 mots. Les listes et mots-tests (32 essais) étaient présentés dans la modalité auditive ou visuelle Galy, Mélan, Cariou, 2008).

Finalement, dans une épreuve de rappel de mots, l'horaire affecte également les performances dans les conditions associées à un traitement superficiel des mots (typographique ou structural), comparé à un traitement de la signification des mots. De plus, les performances des opérateurs dans ces tâches sont corrélées avec leur niveau de vigilance (évalué grâce à un questionnaire), qui évolue selon la courbe habituellement décrite en laboratoire. Pris ensemble, ces résultats indiquent une chute nocturne des performances dans les conditions de tâche plus complexes, et cela parallèlement à une baisse nocturne de vigilance. Bien que les épreuves en question sont basées sur des règles, et ne seraient de ce fait pas sensibles à une privation de sommeil, on peut penser que l'alternance entre plusieurs conditions d'étude dans chaque épreuve s'apparente aux conditions de sollicitation cognitive continue décrites par Harrison et Horne (2000).

Une autre étude a évalué les fluctuations circadiennes des performances en mémoire chez des contrôleurs aériens ($n=17$; Mélan, Galy, Cariou, 2007). Les opérations de contrôle aérien sollicitent fortement le traitement en mémoire de séries de données véhiculées par support visuel (écran radar et strips), notamment lors du séquençage de plusieurs avions ou du traitement des informations relatives à chaque avion (destination, altitude, vitesse etc). L'objectif de l'étude était d'étudier les effets de l'horaire (ou de la vigilance, évaluée à 01h00, 07h00, 13h00, 19h00) sur la mémorisation en fonction de la modalité de présentation (auditive versus visuelle) et du nombre de mots (six versus neuf) et cela dans deux conditions de rappel : reconnaissance d'un mot versus rappel de tous les mots. Des études menées préalablement en laboratoire avaient démontré de meilleures performances dans des épreuves de reconnaissance plutôt que de rappel libre, pour des listes courtes plutôt que longues, et des listes présentées de manière auditive plutôt que visuelle.

Lorsque la vigilance des contrôleurs (évaluée grâce à un questionnaire) était la plus faible (07h00), leurs performances étaient diminuées dans l'épreuve de rappel indépendamment des deux autres facteurs (nombre de mots, modalité de présentation), et seulement pour des séquences de neuf mots présentés visuellement dans l'épreuve de reconnaissance. Ces résultats indiquent, en accord avec les données précédentes, qu'en situation de travail, la baisse de vigilance affecte les performances dans des tâches ou conditions les plus exigeantes sur le plan cognitif. On peut penser que dans ces tâches, contrairement aux tâches plus simples, il est difficile aux opérateurs de fournir l'effort supplémentaire nécessaire pour compenser la baisse de vigilance. Par ailleurs, une analyse approfondie des stratégies de rappel des opérateurs seulement en fonction de la modalité de présentation des mots, indique que des listes de mots entendues sont mieux rappelées que les mots lus en raison d'un groupement spontané de tous les mots d'une liste, mais seulement lorsque celle-ci est relativement courte (6 mots ; Galy, Mélan, Cariou, 2010).

Peu de travaux ont directement étudié les performances au travail et cela pour plusieurs raisons. Tout d'abord,

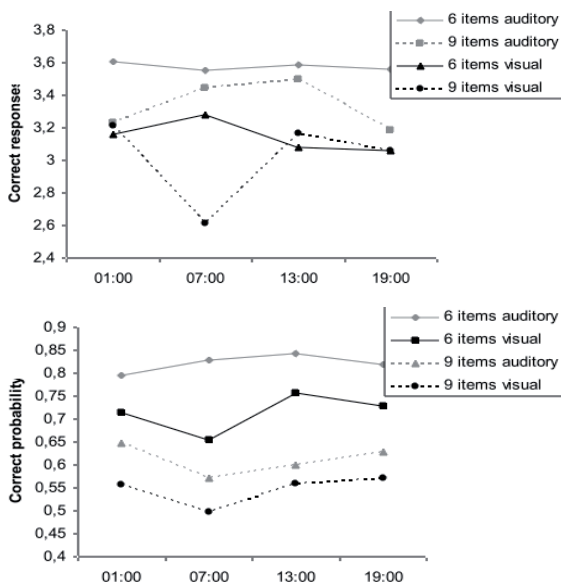


Figure 2 : Probabilité de rappel de 6 ou 9 mots dans une épreuve de reconnaissance (en haut ; voir légende figure 1) et de rappel libre (en bas). Dans la dernière, les participants rappelaient, sans aide et indépendamment de l'ordre, l'ensemble des mots de la liste. Les listes (32 essais) étaient présentées dans la modalité auditive ou visuelle (Mélan, Galy, Cariou, 2007).

L'organisation du travail varie entre les différents secteurs d'une même entreprise, avec un nombre plus réduit de salariés présents sur l'entreprise la nuit, en particulier dans les secteurs administratif et d'entretien. De plus, pour les secteurs d'une entreprise fonctionnant en continu 24h/24, l'organisation du travail varie entre les différents quarts de travail, avec sur le poste de nuit une réduction des effectifs, et un allongement de la durée des horaires de travail. Ces différences dans l'organisation du travail selon les postes peut également engendrer des modifications de l'activité de travail elle-même, généralement dans le sens d'un allègement des tâches à effectuer pendant le poste de nuit. L'ensemble de ces différences peut alors biaiser une comparaison stricte des performances de salariés selon l'heure du jour ou le quart travaillé; difficulté qui est encore augmentée dans des études incluant des salariés de plusieurs entreprises.

En raison de ces difficultés méthodologiques, une méta-analyse, publiée par Folkard et Tucker en 2003, a répertorié seulement trois publications rapportant des mesures de productivité de salariés sur la journée de 24 heures.

La figure 3 montre que pendant la nuit, l'efficacité est diminuée de manière significative par rapport à la moyenne journalière, et atteint celle-ci qu'au-delà de 06:00 heures. Une seconde baisse, moins prononcée et durable est observée après 12:00. Ce creux secondaire a pendant longtemps été qualifié de creux post-prandial et attribué à la prise de repas, alors que la figure montre que la baisse débute à partir de 10:00 heures environ, c'est à dire bien avant l'heure du repas. Ce creux secondaire, seulement partiellement lié aux conséquences de la digestion, serait le reflet d'une organisation semi-circadienne de nos capacités psychologiques, c'est-à-dire d'une variation rythmique toutes les douze heures.

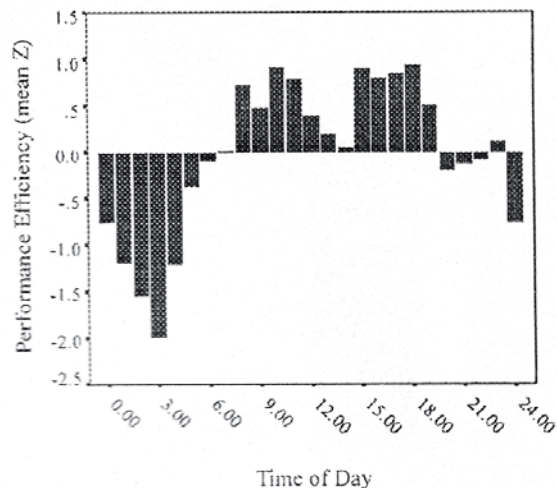


Figure 3 : Evolution de l'efficacité au travail au cours des 24 heures. Méta-analyse de trois études ayant mesuré respectivement le délai de réponse d'un standard téléphonique, les erreurs de lecture de jauges et le temps de réparation d'un fil de tissage dans une industrie textile (Folkard et Tucker, 2003).

Conclusion

Ces résultats montrent que si les performances et la productivité en situation de travail semblent varier selon le même schéma global que celui décrit en laboratoire, elles sont également sensibles à d'autres facteurs, et en particulier le type de tâche à effectuer. D'autres facteurs, et en particulier la motivation des salariés peuvent avoir un impact puissant sur leurs performances, tel que l'indique la disparition de la baisse nocturne de la productivité dans une entreprise de production suite à l'introduction d'un système de primes (Blake, 1971). De même, le personnel hospitalier ou de navigation aérienne témoigne de stratégies variées de compensation de la fatigue nocturne, notamment par une réorganisation des tâches en fonction de l'état des différents membres d'une équipe. Une autre étude, menée dans une entreprise chimique, montre que la consultation des pages écran par des opérateurs supervisant la fabrication décrivait un pic durant la première heure après la prise de poste, et cela également pendant le poste de nuit (Andorre et Quéinnec, 1998). Or, la prise en main par l'opérateur montant d'un tel procédé dynamique nécessite la mise en place d'une représentation de l'état actuel du système par rapport à son état optimum, ainsi que la programmation des opérations de surveillance à réaliser au cours du poste. L'activité cognitive impliquée en début de poste semble donc particulièrement importante, comparée aux heures restantes du poste, et expliquerait, selon les auteurs, le pic d'activité inhabituel observé la première heure de chaque poste, même à 04h00 du matin.

L'ensemble de ces travaux révèle alors clairement que les variations de la productivité au cours des 24 heures ne dépendent pas seulement des rythmes biologiques des opérateurs, mais également de l'activité de travail réalisée, des demandes de la tâche à effectuer, ainsi que de la motivation. Ces facteurs sont, par définition, spécifiques à une situation de travail donnée, et viennent largement complexifier les modèles théoriques proposés à partir des études menées en laboratoire. Une approche différente, consistant à faire passer des épreuves expérimentales à des salariés en situation de travail, représente alors une approche intermé-

diaire, permettant d'aboutir à des résultats généralisables à travers plusieurs situations de travail qui partagent une organisation du travail en horaires atypiques, au-delà des différences concernant l'activité de travail elle-même.

Prof. Claudine Mélan *Université de Toulouse*

Akerstedt T. (2007). Altered sleep/wake patterns and mental performance. *Physiology and Behavior*, 90:209-218.

Andorre V., Quéinnec, Y. (1998). Changes in supervisory activity of a continuous process during night and day shifts. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 21, 179-186.

Blake M.J.F. (1971). Temperament and time of day. In: W.P. Colquhoun, ed. *Biological Rhythms and human performance*. New-York: Academic Press, 109-148.

Folkard S., Tucker P. (2003). Shift work, safety and productivity. *Occupational Medicine (London)*, 53, 95-101.

Galy E., Mélan C., Cariou M. (2008). Investigation of task performance variations according to task requirements and alertness across the 24-h day in shift-workers. *Ergonomics*, 51(9):1338-51.

Galy E., Mélan C., Cariou M. (2010). Investigation of ATCs' response strategies in a free recall task: what makes auditory recall superior to visual recall? *International Journal of Aviation Psychology*, in press.

Harrison Y., Horne, J.A. (2000). The impact of sleep deprivation on decision making: A review. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6, 236-249

Mélan C., Galy E., Cariou M. (2007). Mnemonic Processing in Air Traffic Controllers (ATCs): Effects of Task Parameters and Work Organization. *International Journal of Aviation Psychology*, 17:04, 391-409.

Mélan C. (2008). Sommeil et vigilance lors du travail à des horaires atypiques. *Revue Technique Luxembourgeoise des Ingénieurs, des Architectes et des Industriels*, 2, 105-109.

Wilkinson, R.T. (1992). The measurement of sleepiness. In: R.J. Broughton and R. Ogilvie, eds. *Sleep, arousal and performance*. Boston: Birkhauser, 254-265.



11 et 12 novembre 2010 LUXEXPO HALLS 2&3

24ème Foire de l'Etudiant_

La mobilité est l'une des clés de la construction européenne. Voyager, s'installer, mais aussi étudier ou travailler dans un autre Etat membre de l'UE, toutes ces possibilités désormais ouvertes répondent à l'un des principes fondamentaux du Processus de Bologne*. Depuis sa création en 1987, le programme ERASMUS a fortement favorisé la mobilité des étudiants et presque un million et demi de jeunes Européens sont partis étudier dans un autre pays européen. Le CEDIES, en choisissant la mobilité comme thème central de cette 24e édition de la Foire de l'Etudiant, veut montrer les multiples avantages de ce phénomène.

Pourquoi participer à la Foire de l'Etudiant ?

La Foire de l'Etudiant accueille chaque année près de 8000 visiteurs et quelque 250 exposants. De par la variété de l'information ouverte et par le caractère international des exposants venant de 18 pays différents, la Foire de l'Etudiant à Luxembourg est devenue une manifestation internationale très connue et appréciée du public. Elle vous permettra aussi de relever cette année l'aspect « mobilité » de vos activités.

NOUVEAU

Afin de permettre une meilleure gestion des demandes de participation à la Foire de l'Etudiant, l'inscription à cette manifestation devra se faire par le biais de l'adresse e-mail: foire@mesr.etat.lu

Les conditions générales de participation, les bulletins de demandes de participation et la fiche de commande pour un mobilier supplémentaire sont disponibles sur: www.cedies.lu

Contact: CEDIES-Centre de Documentation et d'Information sur l'Enseignement supérieur
209, route d'Esch, L-1471 Luxembourg

Michèle Hansen
t +352/ 247 88666
michele.hansen@mesr.etat.lu

M. Raymond Harsch
t +352/247 88664
raymond.harsch@mesr.etat.lu



* Source: www.touteurope.fr

In Zusammenarbeit mit ArcelorMittal Bissen wurde an der Universität Luxemburg von 2006 bis 2010 das Tragverhalten von Flachdecken aus Stahlfaserbeton im Bereich negativer Momentenbelastung im Stützenbereich erforscht. Das Hauptziel der Arbeit bestand darin, genaue Informationen über die Versagensart sowie die Traglasten unter rotationssymmetrischer Belastung solcher Konstruktionen aus dem Hochbau zu erhalten.

FLACHDECKEN AUS STAHLFASERBETON

Für das vorliegende Projekt wurden lediglich Stahlfasern als Zugbewehrung eingesetzt, auf herkömmliche Stahlbewehrung wurde ganz verzichtet. Dies hätte bei einer Anwendung in der Praxis den Vorteil, dass durch das Wegfallen des zeitaufwendigen Verlegens der konventionellen Armierung die niedrigen Baukosten einer Flachdecke, bedingt durch deren einfache Geometrie und somit Konstruktion, zusätzlich verringert werden könnten. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden seitens des Industriepartners bereits eine Reihe von Versuchen durchgeführt. Hervorzuheben sind insbesondere die Grossversuche auf dem Gelände von ArcelorMittal in Bissen (L) im Jahr 2004 sowie in Tallin (EST) im Jahr 2007, wo jeweils mehrfeldrige Flachdecken auf ihre Biegetragfähigkeit untersucht wurden [1]. Ziel der

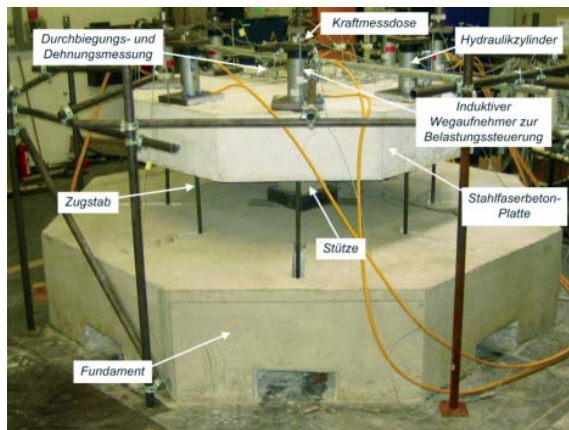


Bild 1_ Aufbau der Plattenversuche

hier vorgestellten Untersuchungen war es herauszufinden, ob bei reiner Stahlfaserbewehrung ein Durchstanzversagen, wie es vom Stahlbeton bekannt ist, auftreten kann.

Experimentelle Untersuchungen

Für die experimentellen Untersuchungen wurden insgesamt 6 achteckige Stahlfaserbetonplatten mit Dicken von 20, 25, 30 und 40 cm untersucht. Zusätzlich wurden bei zwei Probekörpern mit einer Dicke von jeweils 25 und 40 cm eine Aussparung in Haupttragrichtung angebracht. Die ersten vier Probekörper hatten einen Probendurchmesser von 2.34 m, während dieser bei den letzten beiden Platten

auf 1.9 m reduziert wurde. Der Versuchsaufbau, stellvertretend für den negativen Biegemomentenbereich um die Stütze, ist in Bild 1 dargestellt. Die Platte ist mittig gelagert, während die Hydraulikzylinder symmetrisch um die Stütze eine konstante vertikale Wegbelastung aufbringen. Die vertikale Verformung wird von den induktiven Wegaufnehmer am Plattenrand gemessen und anschließend in einen linearisierten Rotationswinkel umgerechnet (siehe Bild 2). Zusätzliche Messtechnik wurde an der Plattenoberseite und -unterseite zur Durchbiegungskontrolle sowie Dehnungsmessung angebracht.

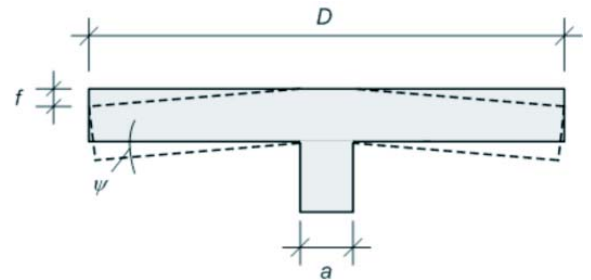


Bild 2_ Neigungswinkel ψ der Platte mit Durchmesser D

Das Kraft-Rotationsdiagramm ist in Bild 3 dargestellt. Insgesamt kann festgehalten werden, dass für sämtliche Versuche ein Biegeversagen mit Ausbildung von Bruchlinien (siehe Bild 3) eintrat. Bei keiner Platte konnte ein Durchstanzversagen mit klassischem Bruchkegel beobachtet werden. Bestärkt wird die Annahme durch eine kontinuierlich

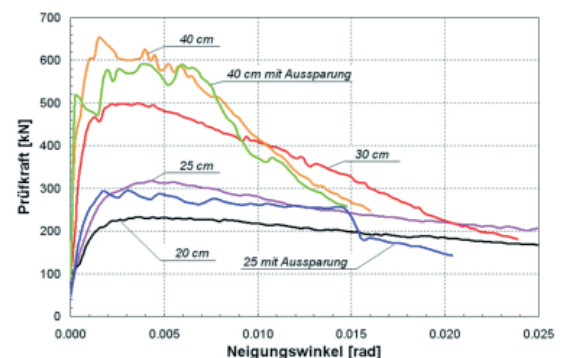


Bild 3_ Kraft-Rotationsdiagramm für die Plattenversuche

steigende Druckdehnung an der Plattenunterseite in radialer Richtung. Im Falle des Durchstanzens ist im Normalfall eine Abnahme der Druckdehnung bei etwa 80 % der Traglast zu beobachten [2],[3]. Insgesamt kann festgestellt werden, dass mit zunehmender Plattendicke die Traglast zunimmt. Ebenfalls nimmt die Traglast bei gleicher Bauteilhöhe infolge einer Schwächung des Auflagerbereiches durch eine Aussparung ab. Ausserdem erfolgt der Lastabfall bei gedungenen Platten im Nachrissbereich deutlich steiler als bei flachen Bauteilen. Die Rissbreiten betreffend kann zusammenfassend festgestellt werden, dass sämtliche Probekörper ein zufriedenstellendes Verhalten unter Gebrauchslast zeigten. Zusätzliche Untersuchungen für Beanspruchungen unter Zwang sind jedoch erforderlich.

Nach Versuchsende wurden die Probekörper komplett aufgebrochen und die Faserverteilung in den Bruchlinien genauer betrachtet. Bei den ersten 4 Probekörpern konnte eine starke Segregation (Faserabsenkung in Richtung Schalungsboden) festgestellt werden. Die letzten beiden Probekörper mit 40 cm Dicke zeigten, bedingt durch einen verringerten Fließmittelgehalt, eine deutlich bessere Faserverteilung auf. Wird ein Mittelwert der Faseranzahl die Bruchlinien einer Plattenhöhe gerichtet, so kann dieser anschließend in einen Faserorientierungswert umgerechnet werden. Letzterer nimmt mit steigender Bauteildicke ab (Bild 4).

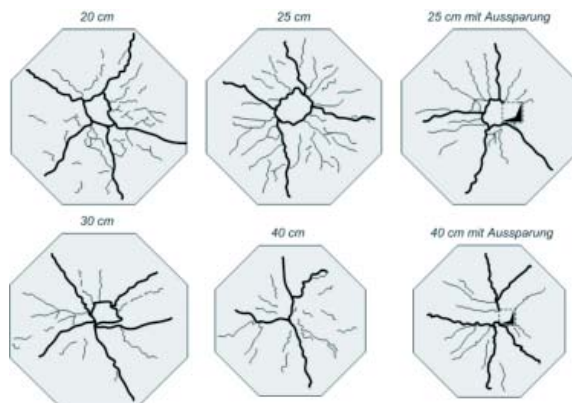


Bild 4_ Rissbilder an der Plattenoberseite der unterschiedlichen Plattenversuche (fettgedruckte Linien stellen die Bruchlinien dar)

Bemessungsmodell

Neben nichtlinearen Finite-Elemente-Rechnungen für die genaue Beschreibung des Traglastabfalls infolge einer Aussparung in Stützennähe wurde ein auf der Bruchlinientheorie basierendes Berechnungsmodell erstellt. Hierbei werden für ein bestimmtes statisches System a priori Bruchbilder (Rissbilder, siehe Bild 4) angenommen und im Grenzzustand der Tragfähigkeit analysiert. Die anzusetzenden

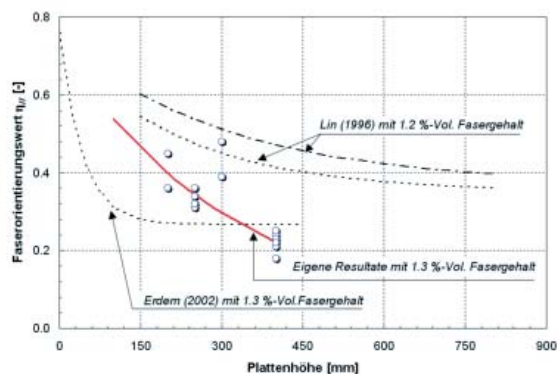


Bild 5_ Faserorientierungswerte (Universität Luxemburg, rote Linie) für unterschiedliche Plattendicken im Vergleich zu früheren Untersuchungen

Bemessungsmomente m_{Rd} werden den Bemessungstragmomenten m_{Rd} gegenübergestellt. Ist letzterer größer als die Belastung, ist die Tragfähigkeit gewährleistet, andernfalls muss entweder die Spannweite und/oder die Plattendicke erhöht werden. Von allen möglichen Bruchbildern ist das mit der maximalen Momentenbelastung zu wählen.

Das Bemessungstragmoment m_{Rd} wurde anhand des Kräftegleichgewichts zwischen der Zug- und Druckzone im

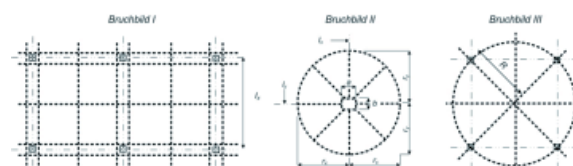


Bild 6_ Drei Möglichkeiten für Bruchbilder bei Flachdecken: I – Flächenlast in allen Feldern mit globalem Versagen, II – lokalem Versagen an der Stütze, III – Feldversagen mit Flächenlast in einem Feld

Querschnitt berechnet (siehe Bild 6). Für die angesetzten Zugfestigkeiten, resultierend aus den Biegezugversuchen, konnte anhand eines semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes ein Sicherheitsfaktor von 1.8 hergeleitet werden. Hierfür wurde die log-normale Verteilung der Festigkeiten, dargestellt in Bild 7, sowie deren Varianz von 0.2 eingebunden. Die Druckzone wurde anhand der Richtlinien aus der DIN 1045-1 [4] berechnet.

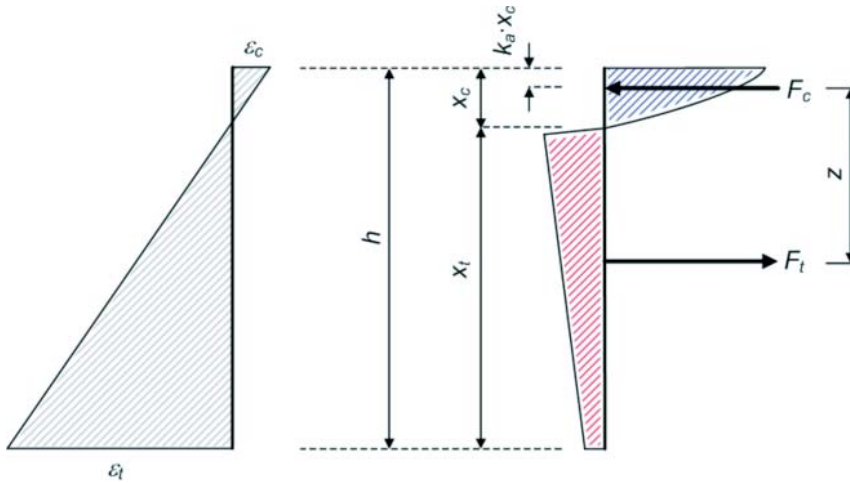


Bild 7_ Gleichgewichtsberechnung im Querschnitt

Anhand der vorgestellten Rechenmethoden konnten am Ende der Untersuchung Bemessungsdiagramme (siehe Bild 8) für unterschiedliche Plattendicken bei einer Verkehrslast von 3 kN/m² (Bürogebäude) zusammengestellt werden. Für eine bestimmte Spannweite gilt es zu überprüfen, ob

die Kurve(n) der Tragfähigkeit mRd über exponentiell ansteigenden Kurven der Belastungsmomente md für verschiedene Bruchbilder liegt. Es wird deutlich, dass lediglich die Bruchbilder I und II betrachtet werden müssen, da das Bruchbild III in jedem Fall kleinere Belastungsmomente hervorruft. Neben den eigenen Rechenwerten für mRd (unterste der 3 gezeigten Linien) sind zusätzlich die Werte nach einer Bemessung anlehnend an das DBV-Merkblatt [5] sowie an die RILEM-Vorschläge [6] als Vergleich aufgeführt.

Zusammenfassung

Aus dem vorgestellten Untersuchungen können eine Reihe von Schlussfolgerungen gezogen werden. Insgesamt konnte für sämtliche Platten bei symmetrischer Belastung ein duktiles Biegeversagen ohne Durchstanzen festgestellt werden. Anhand von zwei Probekörpern mit Öffnungen konnte die Schwächung des Auflagerbereiches bei Aussparungen gezeigt werden. Die Rissöffnungen unter Gebrauchslast lagen allesamt unter den von der Norm DIN 1045-1 [4] festgelegten Maximalwerten. Die Analyse der Bruchlinien ermöglichte eine Beschreibung der Faserorientierung mit zunehmender Bauteilhöhe. Das Berechnungsmodell sowie die Bemessungsdiagramme zeigen die Grenzen einer reinen Stahlfaserbewehrung für Flachdecken auf. Im Vergleich zu herkömmlichem Stahlbeton müssten die Stützweiten reduziert sowie die Plattendicken erhöht werden. An dieser Stelle könnten jedoch auch leistungsfähigere Fasern, welche einen geringeren Kraftabfall bei gleicher Dehnung im Rissbereich ermöglichen, Abhilfe schaffen. Es gilt jedoch zu beachten, dass für eine Anwendung in der Praxis zusätzliche Untersuchungen im Bereich der Faserorientierung, der Betonrezeptur sowie des Tragverhaltens unter Zwang durchzuführen sind.

Dr. Julien Michels

julien.michels@empa.ch

Durchführung und Betreuung der Arbeit an der Universität Luxemburg

Julien Michels Doktorand

Danièle Waldmann Doktorvater und Projektleiter

Stefan Maas Weitere Mitglieder der Jury

Jürgen Schnell Technische Universität Kaiserslautern

Lucie Vandewalle Katholieke Universiteit Leuven

Arno Zurbes

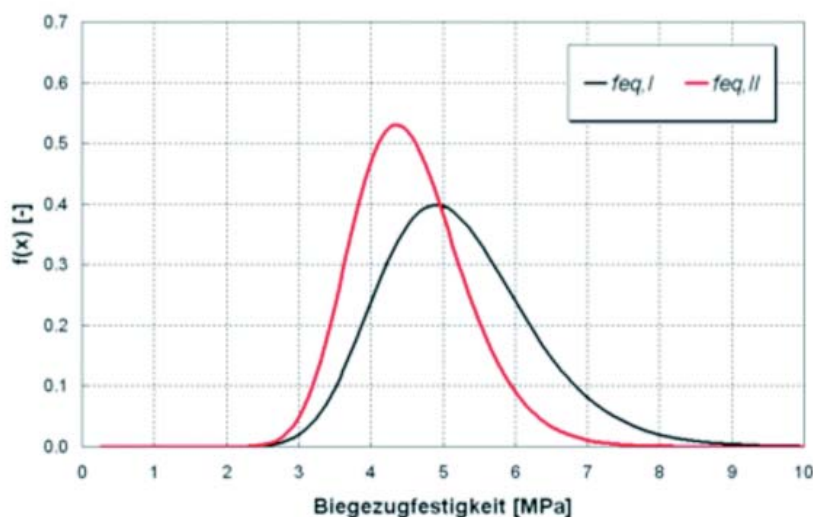
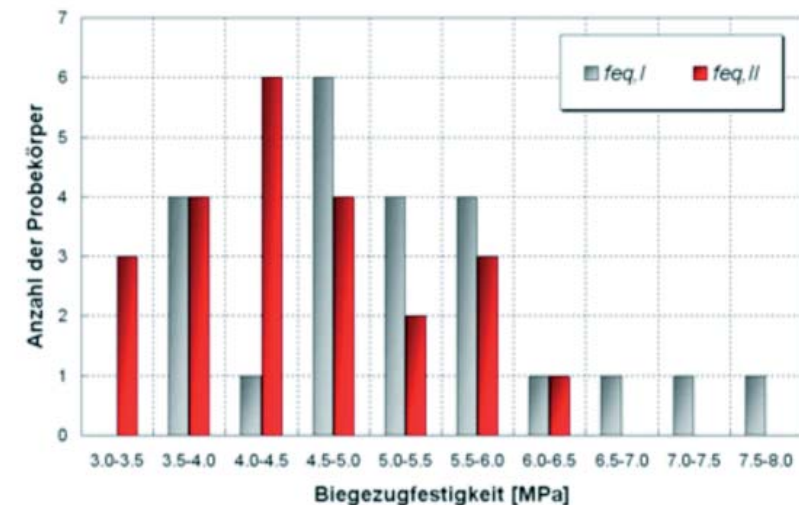
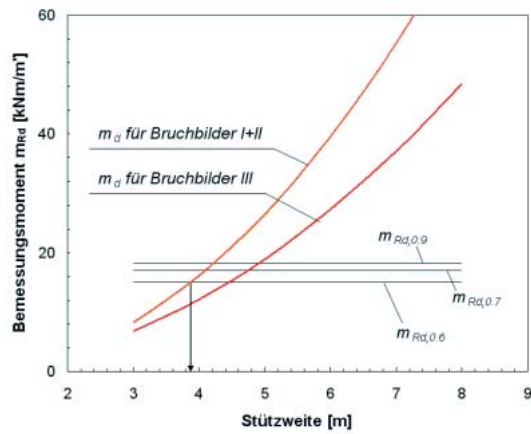
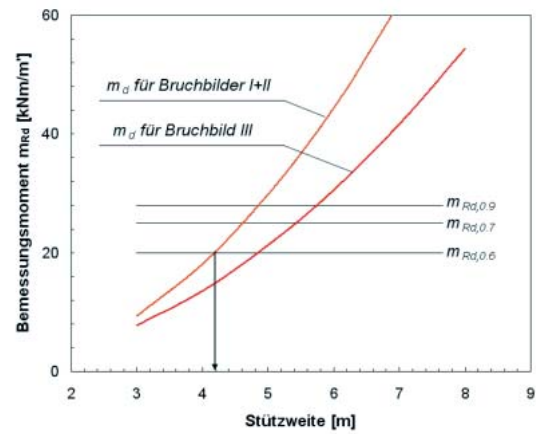


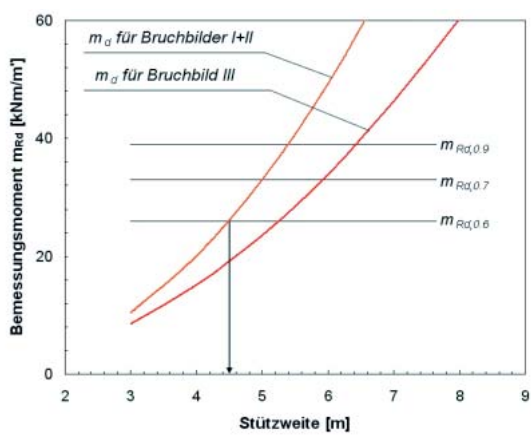
Bild 8_Festigkeitsverteilung und log-normale Anpassung der Biegezugfestigkeiten für Stahlfaserbeton



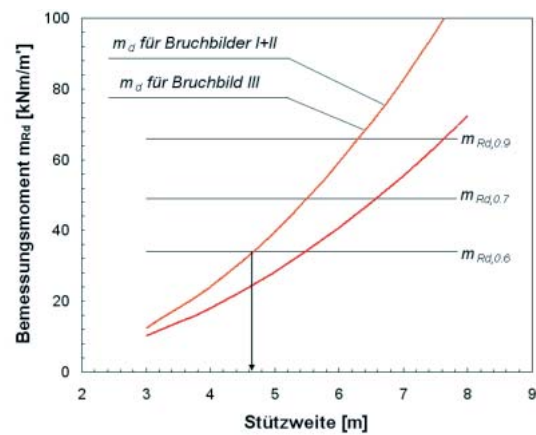
(a) 20 cm



(b) 25 cm



(c) 30 cm



(d) 40 cm

Bild 9_ Bemessungsdiagramme für Flachdecken unterschiedlicher Dicken von 20, 25, 30 und 40 cm unter einer Verkehrslast von 3 kN/m^2 (Eigengewicht im Diagramm einbezogen)

Literatur

[1] Destrée X.: Free suspended elevated slabs of steel fibre reinforced concrete: full scale test results and design,

7th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete, S. 941-950, Chennai, India, 2008

[2] Guandalini S.: Poinçonnement symétrique de dalles en béton armé, Dissertation, EPF Lausanne, 2005

[3] Beutel R.: Durchstanzen schubbewehrter Flachdecken im Bereich von Innenstützen, Dissertation RWTH Aachen, 2002

[4] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Bemessung und Konstruktion, 2008

[5] Deutscher Beton Verein (DBV): Merkblatt Faserbeton, Fassung 2001

[6] RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ε design method, Materials and Structures 36:560-567, 2003

Keeping or extending market shares, harmonizing markets and productions, maintaining the order-book at a convenient level, maximizing profits are the main, sometimes contradictory aims of the sales department. Beyond the market developments and current selling prices it must be aware of the company's manufacturing capabilities and production costs. In this respect it depends on the active help of both the shop floor and the book-keeping department. This paper presents a synoptic view of all relevant aspects and eventually yields a realistic and relatively simple computing method that could be very helpful to efficient salesmanship.

TARGETING SALES_

The bottom line of any company can be somewhat boosted by systematically pushing up the sales of the most profitable products.

Two conditions must be fulfilled:

_demand must be in some excess compared to the processing capacities of the plant (otherwise there would be no possibility of choice left to the sales department)

_the profitability of each product must be taken into account.

Despite its simplicity, the idea of selective sales must overcome some unexpected conceptual obstacles:

1. What are the potential markets open to given production facilities? The answer depends on the way the issue is handled :

_by a general market survey (that in many cases would yield too large and too heterogeneous a demand)

_by summing up the sales expectations of the various selling points for the current quarter

_by considering the existing product mix as registered in the order-book (that – despite its being the outcome of years of selling practice and of matching demand and processing facilities – can always be improved) (the starting mix of charts 1 to 5 is supposed to have been fixed in this way)

2. Operating by selective sales comes down to neglecting the less profitable markets. The danger is that, once the relation with a customer has been interrupted, it may be difficult to restore it afterwards. That's why, even in less profitable areas, some level of activity is currently maintained, although with minimal quantities. Generally speaking, selective sales must compromise between profitability and customer diversity. Any increase in profit must be achieved with a minimal distortion of the demand. At first sight, the mathematical definition of the distortion as given further below may seem quite an arbitrary one; however, as we shall see, its implications will be astonishingly close to reality.

3. Selling prices are fixed by the market. Reference prices, assessed by the Commercial Department, depend on the

production mix which has actually been sold. The more selective the sales, the higher these prices. That is why the process of selection must be progressive. In order to avoid upsetting the relations with a large number of customers at short notice, the mix ought to be changed by small steps.

4. The reference prices of the products depend on their profit margins. Obviously, different products cannot be compared but by their variable costs. Indeed, as the fixed costs, by their very definition, are independent of the mix, it is not necessary to take them into account. Furthermore, as they cannot be correctly distributed among the various products, by attempting to do so one would unduly and unnecessarily bias the results (nevertheless, the production facilities, by trying to match the mix variations, may imply some change in the fixed costs; then, at the breaking point, appropriate scenarios, taking total costs – fixed and variables – into consideration, will settle the issue).

5. The seemingly ambiguous behaviour of bottlenecks is another delicate topic. Let us consider a production structure composed of any number of different processing-units, each fulfilling a specific task. Each of the various products passes in a given sequence through a given number of these units. Planning a product mix is a situation quite different from that of achieving it. Provided the processing patterns and processing-times are different enough from product to product, any number of simultaneous bottlenecks along any production flow can be established, in theory. Depending on the orders coming in at random, the quantities finally sold, of course, cannot exactly match the planned mix: per flow, just one of the units or some of them – alternately – will end up as bottlenecks. But, as long as the future loads of the various units are not known, we are in the planning mode and each processing-unit must be seen as a potential bottleneck. Whatever the complexity of the production structure and the diversity of the products and their processing patterns, the optimizing computing procedures that will solve our problem (quadratic programming) in a quite autonomous way will detect the units that for a given mix will theoretically become bottlenecks or – in reality – will end up close to their respective saturation points, as well as those whose capacities, in any event, will be in excess.

Each product i is characterized by four kinds of parameters:

s_i = selling price per quantity unit

v_i = variable production costs per quantity unit

$m_i = s_i - v_i$ = brute profit margin per quantity unit

c_{ui} = production-time (capacity consumption) needed at production-unit u per quantity unit of product i . The variable production costs v_i of product i are the sum of the costs – here the variable costs – occurring at all the production-units during the processing operation of the quantity unit of product i (in order to compensate for any loss or gain of material during the operation, the c_{ui} 's are assessed by measuring the quantities of product i processed at production-unit u **in terms of finished product**).

For each product i there are two quantity variables:

q_i = demand (quantity per time-unit, per quarter, for instance)

p_i = production (quantity per time-unit per quarter)

For one and the same product i , quantities q_i , p_i are additive respectively.

Each processing-unit u has its capacity C_u (capacity = production-time available at production-unit u per time-unit, per quarter, for instance).

The “global” parameters are:

(1): $P_u = \sum_i (p_i * c_{ui})$ = total production-time necessary at production-unit u to process the whole of the production-mix scheduled for the quarter considered

(2): $M = \sum_i (p_i * m_i)$ = total brute margin of the whole of the production scheduled for the quarter

Per product i the distortion d_i of the quarter is measured by the turnover $tq_i (= q_i * s_i)$ related to demand q_i , weighted by the square of the relative gap between the two turnovers, the one tq_i concerning demand q_i , the other $tp_i (= p_i * s_i)$ concerning production p_i : $d_i = tq_i * [(tq_i - tp_i) / tq_i]^2 = tq_i * (1 - tp_i / tq_i)^2$. The distortions have the dimension of a

turnover. As they are additive, the global distortion of the quarter amounts to

$$(3): D = \sum_i d_i = \sum_i [tq_i * (1 - tp_i / tq_i)^2] = \sum_i [q_i * s_i * (1 - p_i / q_i)^2].$$

What exactly are the relations between demand, product-mix, distortion, production quantities, production capacities and margins?

As already pointed out, the Sales Department has three tasks: as far as possible it should satisfy the customers' demand, keep the composition of the order-book abreast of the production possibilities, maximize the bottom-line. Our approach makes sense only if the demand exceeds the production capacities. Otherwise the mix would simply have to be accepted the way it is coming in.

The second task comes down to a constraint rather than to an objective. As the locations of the bottlenecks are not known beforehand, the constraints that limit the production are expressed by inequalities ($P_u \leq C_u$). Other constraints concerning the production quantities come on top of it: in any case these quantities must not be inferior to zero; sometimes minimal quantities ($p_i \geq p_{i \min}$) are imposed (in many instances quantities p_i must not exceed certain limits: $p_i \leq p_{i \max}$).

To begin with, we consider only two of the three targets, the conformity to demand being the main one. If, for argument's sake, the increase of benefits is completely neglected, the problem will be confined to the minimization of distortion D , the limitation of both the processing facilities and the production quantities being taken into account. According to relation (3), D measures the mean gap between corresponding q_i 's and p_i 's.

If, anyhow, the capacity constraints keep the production from equaling demand, why shouldn't certain suitable products be somewhat boosted and in this way increase profitability? As it is mathematically impossible to pursue two different targets simultaneously, the increase of profit is introduced in the form of a constraint (M according to relation (2)). The computation yields the minimal distortion D for a fixed brute margin M or, the other way round, the

highest possible margin for a given distortion. An optimum of this sort (constrained optimum) is resolved by means of an auxiliary function F , where the constraints are weighted with respect to the main function D by the Lagrange multipliers L_u , L_i , L_M

$$(4): F = D + \sum_u [L_u * P_u] - \sum_i (L_i * p_i) - L_M * M \\ = \sum_i [q_i * s_i * (1 - p_i / q_i)^2] + \sum_u [L_u * \sum_i (p_i * c_{ui})] - \sum_i (L_i * p_i) - L_M * \sum_i (p_i * m_i)$$

(the expressions are preceded by + or – in a way conferring positive values to all the multipliers: D is to be minimized, M maximized, the P_u 's have upper, the p_i 's lower limits).

The F -function is minimized by the correct choice of the p_i 's. By nullifying the derivatives of F with respect to the p_i 's we get the algebraic expressions of the optimal p_i 's (where $e_i = 1/2 * q_i / s_i$)

$$(5): p_i = q_i + e_i * [L_M * m_i - \sum_u (L_u * c_{ui}) + L_i].$$

The problem of selective sales is thus completely solved by formulas (5) and the relations expressing the constraints

$$(6): \sum_i (p_i * c_{ui}) \leq C_u, \quad p_i \geq p_{imin}, \quad \sum_i (p_i * m_i) = M.$$

Due to the inequalities in (6), the problem, i. e. the assessment of the multipliers L_M , L_u , L_i and the p_i 's belongs to the realm of linear programming.

Parameters q_i , s_i (hence e_i), m_i , c_{ui} , C_u , p_{imin} are given. The imposed value of M evolves between its minimum value (point of zero distortion) and its utmost value (solution of pure linear programming regardless of distortion).

Expressions (3) and (1) allow to assess the degree of distortion (the knowledge of which, in fact, is of no practical use) and the load of the various production-units, independently of there being bottlenecks or not.

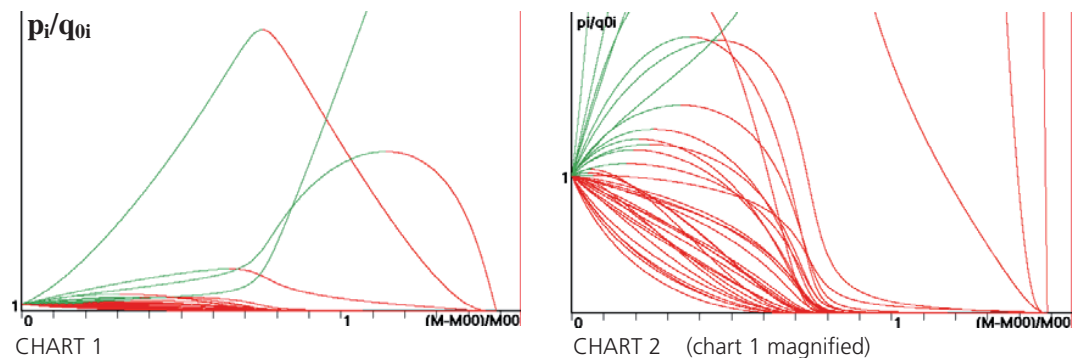
Starting with an existing mix, charts 1 and 3 show how the production-quantities of 35 products ought to change with the increase of the total margin. The evolution of the total

brute margin – given by $[(M - M_{00}) / M_{00}]$ – brings about continuous changes of the mix – expressed by (p_i / q_{0i}) (M_{00} and the q_{0i} 's being the initial values of M and of the q_i 's). The parameters of the products, more or less realistic, have been created by appropriate random generators.

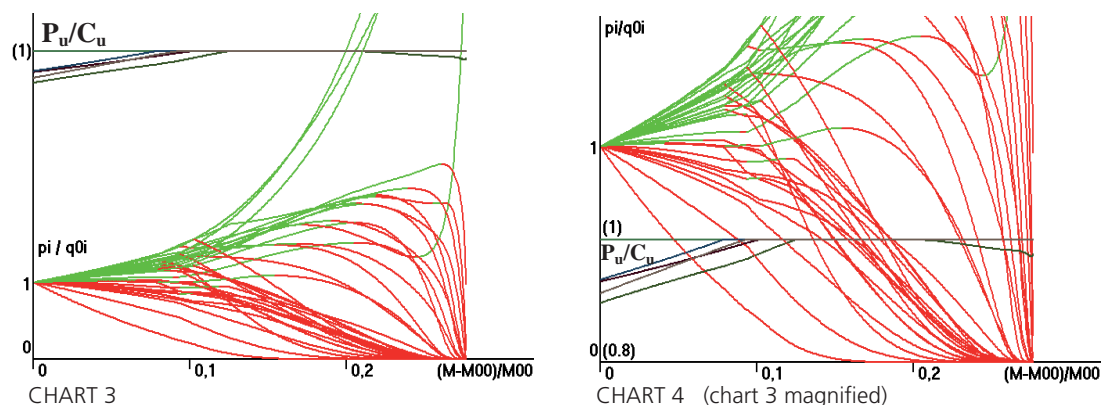
Charts 1 and 3 give a general survey; for more detail charts 2 and 4 magnify the ordinate of charts 1 and 3 respectively. Charts 1 and 2 admit one single bottleneck. For charts 3 and 4, theoretically the five production-units occasionally form bottlenecks all at the same time (obviously, the easiest way of increasing profits with a minimal distortion of demand begins, if possible, with the saturation of the production units).

The charts have been established by the “progressive method”: for each value of M the associated product mix becomes the demand of the next M -value. Any set of p_i 's converts at once into the q_i 's entering the computation of the set of p_i 's located at its immediate right (an infinitesimal progression dM of M – hence a continuous evolution of the q_i 's and p_i 's – would be ideal). Things happen as if in formula (3) $D = \sum_i [q_i * s_i * (1 - p_i / q_i)^2]$ had been replaced by $D = \sum_i [q_i * s_i * [\ln(p_i / q_i)]^2]$. For a given **relative** deviation of p_i from q_i , no matter whether positive or negative ($p_i / q_i = 5 / 1$ or $1 / 5$, f. i.), the distortion symmetrically amounts to $[\ln(5)]^2 = [\ln(.2)]^2 = 2.59$. Any p_i equal to zero (by assumption q_i being infinitesimally larger than p_i) would imply a distortion equal to $d_i = q_i * v_i * [\ln(0 / q_i)]^2 = \infty$ and thus could not be optimal. The progressive method keeps the p_i 's from reaching zero or values below zero. The p_i 's representing unfavorable products **asymptotically** (exponentially) tend towards nil. At the final point – the one of highest possible margin – the results of the quadratic and those of the pure linear programming coincide. There, the number of remaining products is equal to the number of remaining bottlenecks (not considering the products whose quantities have previously reached their imposed upper or lower limits).

EVOLUTION OF PRODUCTMIX WITH INCREASING PROFITS SINGLE-BOTTLENECKED MANUFACTURING SHOP



EVOLUTION OF PRODUCTMIX WITH INCREASING PROFITS 5-OPERATIONAL PROCESSING PATTERNS



Reference prices

According to relation (5), for increasing M , depending on the algebraic sign of expression $[L_M * m_i - \sum_u (L_u * c_{ui})]$, the p_i 's are growing or diminishing (for p_i 's not constrained by commercial limits the L_i 's are equal to zero). For each product i the difference between m_i (actual margin) and $mr_i = (\text{reference margin}) = \sum_u [(L_u / L_M) * c_{ui}]$ decides if, with respect to the prevailing mix and its mean margin, the product has to be pushed ($m_i > mr_i$) or restricted ($m_i < mr_i$). Adding the variable costs v_i to the *reference margin* mr_i one gets the *reference selling price* $sr_i = mr_i + v_i$ of product i (versus its actual selling price s_i).

But the resulting reference prices should not be biased. In the general case ratios L_u / L_M have two components, the one related to the margin and the one related to distortion. Reference prices, however, must be bare of distortion elements. Now, the progressive method happens to change the L_u / L_M into the differentials $a_u = dL_u/dL_M$, which – as can be proved – are free of any trace of distortion. That is the decisive advantage of the progressive method and the reason to adopt it once and for all. For production-unit u , a_u is the marginal value of its constraint C_u (the marginal value of a non-bottleneck unit equals zero). Chart 5 shows the evolution of the a_u 's corresponding to charts 3 and 4.

The marginal values depend on the product mix and its profit potential. The a_u of production-unit u applies to all the products actually or possibly processed by u . Their reference prices, at the point reached so far (i. e. for a given M), amount to $mr_i = \sum_u (a_u * c_{ui}) = a_1 * c_{1i} + a_2 * c_{2i} + a_3 * c_{3i} + a_4 * c_{4i} \dots$ completed by the variable costs v_i of product i (the c_{ui} 's are supposed to be known, as well as the variable costs v_i ; for any product not processed by u , c_{ui} equals zero). Any change of mix requires great care. Too brutal an additional sale of relatively important quantities of products – at the moment of an apparent high profitability – may upset the bottleneck pattern to a point that might jeopardize the expected benefits.

Selective sales check the price structure rather than the general price level. If for all products the selling prices equalled their references ($s_i = sr_i$ or $m_i = mr_i$), any mix variation would have no more any effect on the profitability, whatever its level. The beginning point of any p_i -curve would then coincide with its end-point, so that there wouldn't be any curve at all. The adequate general price level is a quite different but equally important question. It concerns the ratio between turnover and global production costs, fixed and variable. Finally we hit the real issue: in order to remain profitable, on top of the search for a fair price structure and an optimal product mix, any company must constantly tend to reduce its total costs.

In a large array of questions the introduction of distortion yields unexpected results. For instance:

- _optimizing the loads of parallel production-units
- _finding out the neutral (unbiased by profit boosting) load of the production-units for a given demand
- _homogenizing a set of various markets (while maintaining the accepted price differences) in order to compare the price structures from market to market in a way unbiased by the systematically unequal price levels
- _assessing the appropriate selling prices outside and inside the company
- _spotting the most harmful bottlenecks

Henri Muller
ingénieur diplômé

MARGINAL BOTTLENECK VALUES (a_u) OF CHARTS 3 AND 4

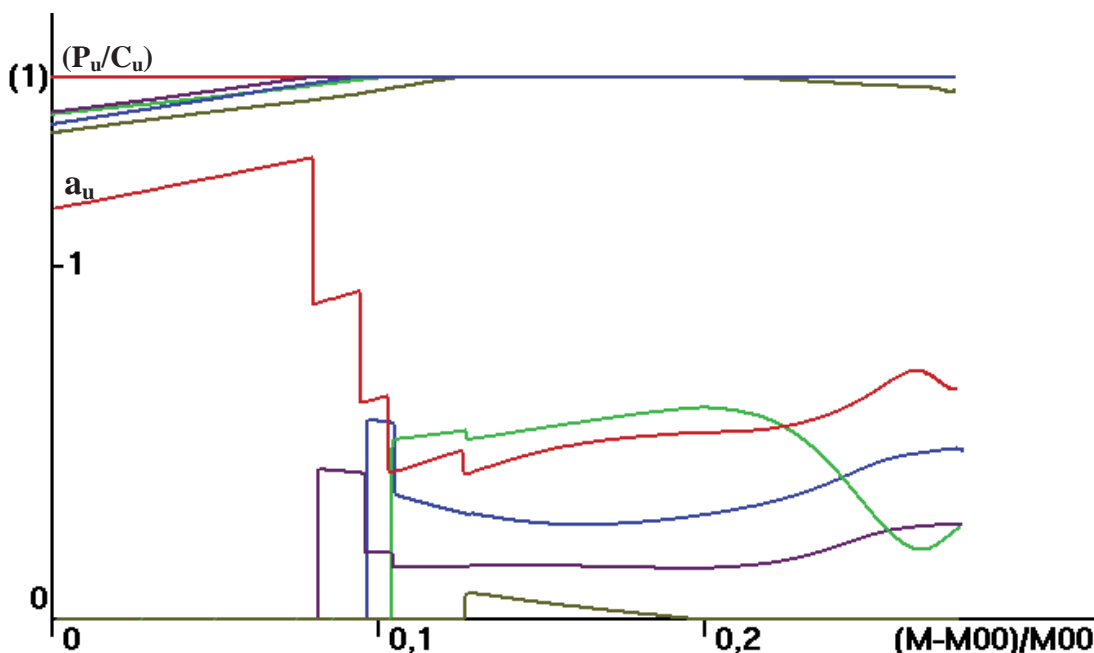


CHART 5

Das Motto dieser Arbeit stammt aus der Einführung zu Max Planck: "Eight Lectures on Theoretical Physics"[1] welcher dieser im Jahr 1909 an der Columbia University in New York gehalten hat. Sie geben, besser als alle längeren Erklärungen, das Programm Planck wieder und zeigen gleichzeitig auf die Schwierigkeiten hin, welche er auf seinen wissenschaftlichen Weg antraf: das Problem der Irreversibilität von gewissen physikalischen Prozessen. Dieses gleiche Problem bildete auch die zentrale Frage in der Kontroverse zwischen Planck und dem älteren Ludwig Boltzmann. Im Laufe dieser wissenschaftlichen Diskussion musste, wie wir sehen werden, Planck Ideen aus dessen Gastheorie übernehmen, blieb aber im Gegensatz zu jenem, von der absoluten Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik überzeugt. Boltzmann sah in diesem Prinzip nur eine Aussage der statistischen Mechanik, welche nicht für die Gesamtheit aller möglichen Fälle unbedingt gelten müsste.

Zur Vorgeschichte der Quanten Theorie: Boltzmann, Planck und das H-Theorem

Nature's microscopic disorder implies that what happens today can never be undone Peter Persic

I

Es sollen zuerst jedoch die beiden Verantwortlichen für diese neue Entwicklung vorgestellt werden. Wir wollen im Folgenden diese Kontroverse darstellen und die Wege aufzeigen, welche bei Max Planck schliesslich zur Idee des Wirkungsquantums führten und damit die Teilchenphysik begründeten.

Ludwig Edouard Boltzmann wurde 1844 geboren und studierte an der Universität Wien von 1863-1866 Mathematik und Physik. Er hat im Laufe seines Lebens auf allen damals aktuellen Gebieten der Physik gearbeitet. Doch die meisten seiner Arbeiten beschäftigten sich mit der anschaulichen Deutung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik und er kam sein ganzes Leben immer wieder auf dieses Thema zurück. Dieser zweite Satz wird heute in folgende Form gefasst: "Es existiert für jedes thermodynamische System die Zustandsgrösse Entropie S . Diese hängt nur von den inneren Zustandsvariablen und nicht von den äusseren Koordinaten ab,...". Boltzmann versuchte zuerst diesen Satz aus dem Hamiltonschen Prinzip der kleinsten Wirkung zu beweisen und damit im Gebiet der klassischen Mechanik zu bleiben. Unter dem Einfluss der Arbeiten von J.C.I. Maxwell übernahm er jedoch immer mehr dessen probabilistischen Ansatz. So verallgemeinerte Boltzmann Maxwells Ableitung der Geschwindigkeitsverteilung der Gasatome auf mehratomige Moleküle. Boltzmann war sehr besorgt um Anschaulichkeit in seinen Arbeiten. So schreibt er: "Ähnliche weit allgemeinere Probleme wurden zwar schon von Maxwell aufgelöst; allein, teils der Vollständigkeit halber, teils auch weil Maxwells Deduktionen wegen ihrer Kürze schwer verständlich sind, soll dieses einfachste aller hierher gehörigen Probleme nochmals behandelt werden"[2]. Maxwell beschäftigte sich ausführlich mit Boltzmanns Arbeiten und diese fanden -auch vielleicht deshalb- im englischen Sprachraum einen weit grösseren Widerhall als im deutschen. Auch das Funktional H für die ursprünglich von Boltzmann eingeführte Entropie S kam aus England zurück in die deutsche Wissenschaft und wurde von Boltzmann neu übernommen. Er formulierte die sog. "Boltzmann Gleichung,,

(1.1)

$$S \cong \log P + cte$$

und wurde mit seinen Überlegungen zum Wegbereiter der Quantenmechanik. Er setzte die Energievariable als ganzzahliges Vielfaches des Energiequants an und hatte damit schon 1872 die erst 1900 von Max Planck postulierte Quantisierung der Energie vorweg genommen. Jedoch waren seine Überlegungen grundverschieden von denen seines jüngeren Kollegen. Boltzmann suchte einen Zusammenhang zwischen der Entropie S und der thermodynamischen Wahrscheinlichkeit P und bewegte sich damit ausschliesslich auf dem Gebiet der statistischen Physik. Die thermodynamische Wahrscheinlichkeit ist dem vom betrachteten Makrozustand belegten Phasenraumvolumen proportional. Klassisch entspricht jedem Punkt im Phasenraum ein Mikrozustand, jedoch ist dieses Kontinuum nicht abzählbar und musste deshalb diskretisiert werden um damit eine Abzählbarkeit zu erreichen. In dem in Zellen gleicher endlicher Grösse eingeteilten Phasenraum und der Zuordnung eines Mikrozustandes zu jeder Zelle wird jedem einzelnen Molekül ein ganz bestimmter diskreter Energiewert zugewiesen. Die Gesamtzahl der Mikrozustände ergibt sich dann durch alle möglichen Permutationen der einzelnen Moleküle, die sogenannte Permutabilität. Diese Grösse geht in die sogenannte Boltzmann Gleichung ein. Die von ihm vorgenommene "Quantisierung" der Energie war keineswegs nur ein mathematischer Kunstgriff, sondern Boltzmann hat die diskreten Energiewerte durchaus ernst genommen, und er hat sich geweigert seine Theorie zugunsten von W. Ostwalds Energetik mit kontinuierlichen Werten der Energie aufzugeben.

Einen anderen Weg zur Boltzmann Gleichung hat Max Planck, damals schon Professor für theoretische Physik in Berlin, eingeschlagen. Schon seine Dissertation an der Universität München von 1879 hatte zum Titel: "Über den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie" und er wollte diesen Satz mit rein thermodynamischen Mitteln beweisen. Diese Teilwissenschaft der Physik beschäftigt sich mit Wärme als eine Form von Energie, sowie mit den Bedingungen unter denen es möglich ist, Wärme in andere Formen von Energie umzuwan-

deln. Die Thermodynamik hatte sich zuerst als reine deterministische Wissenschaft, besonders unter dem Einfluss der Dampfmaschine und den Versuchen diese effizienter zu konstruieren herausgebildet. H.v.Helmholtz, G. Kirchhoff und R. Clausius formten diese Erkenntnisse zu einer theoretischen Disziplin, welche von L. Boltzmann in einem mehr statistischen Sinne weiterentwickelt wurde und von dem jungen Planck nach einem gewissen Zögern mit Begeisterung übernommen wurde. Doch der zweite Hauptsatz dieser noch jungen Wissenschaft war alles andere als direkt einleuchtend und bedurfte nach Planck eines genauen Studiums. Er schreibt: "Clausius leitete den Beweis seines zweiten Hauptsatzes aus der Hypothese ab, dass die Wärme nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergeht"[3]. Planck sieht im zweiten Hauptsatz der Wärmelehre ein Naturgesetz und für ihn kann es keinen Kreisprozess irgend welcher Art geben um dieses Gesetz rückgängig zu machen. Er will jedoch eine eindeutigere Fassung des Satzes und gibt ihm die Form: "Der Prozess der Wärmeleitung lässt sich auf keinerlei Weise vollständig rückgängig machen,"[3]. Damit drückt Planck das gleiche aus wie Clausius und er erläutert: "(Meine Formulierung) besagt, dass man bei dem Versuch, den Prozess rückgängig zu machen, ganz beliebige Hilfsmittel benutzen darf, mechanische, thermische, elektrische, chemische, nur mit der Bedingung, dass nach Bedingungen des angewandten Verfahrens die benutzten Hilfsmittel sich wieder genau in dem natürlichen Zustand befinden wie am Anfang, als man sie in Benutzung nahm. Es soll eben überall in der ganzen Natur der Anfangszustand des Prozesses wieder hergestellt sein. Ein Prozess, der sich auf keinerlei Weise vollständig rückgängig machen lässt, nannte ich "natürlich", heute heisst er "irreversibel,"[3]. Wir werden im nächsten Abschnitt auf den Begriff der Irreversibilität in der Thermodynamik zurückkommen. Aber wir werden zuerst noch Planck weiterfolgen. Er schliesst, dass das Wesentliche in der Entscheidung darüber, ob ein Naturvorgang irreversibel oder reversibel ist, nur von der Beschaffenheit des Anfangszustandes und des Endzustandes abhängt. Über die Art und den Verlauf des Vorganges braucht man gar nichts zu wissen. Denn es kommt nur darauf an, ob man, vom Endzustand ausgehend, auf irgendeine Weise den Anfangs-

zustand in der ganzen Natur wiederherstellen kann, oder nicht. Im ersten Fall, dem der irreversiblen Prozesse, ist der Endzustand in einem gewissen Sinne, von dem Anfangszustand ausgezeichnet. Die Natur besitzt sozusagen eine grössere Vorliebe für ihn.

Im zweiten Falle, der reversiblen Prozesse, sind die beiden Zustände gleichberechtigt. Als ein Mass für den Unterschied zwischen den beiden Arten von Prozessen ergab sich für Planck die clausiusische Entropie, welche auch den Sinn des zweiten Hauptsatzes bestimmt durch das Gesetz, dass bei jedem Naturvorgang die Summe der Entropien aller an dem Vorgang beteiligten Körper zunimmt, jedoch im Grenzfall, für einen reversiblen Vorgang unverändert bleibt. Auch die allgemeine Interesselosigkeit seiner Lehrer, ja des grössten Teils der gelehrten Welt, hielt Planck nicht davon ab das Studium der Entropie fortzusetzen, weil er diesen Begriff neben der Energie als die wichtigste Eigenschaft eines physikalischen Gebildes betrachtete. Da das Maximum das endgültige Gleichgewicht bezeichnet, so ergeben sich aus der Kenntnis der Entropie alle Gesetze des physikalischen und des chemischen Gleichgewichtes. Planck merkte erst später, dass ihm J.W. Gibbs mit seinen Entwicklungen zugekommen war und die von ihm gefundenen Sätze, teilweise in noch viel allgemeinerer Fassung vor ihm formuliert hatte.

Für Planck ist der zweite Hauptsatz der Thermodynamik absolut gültig, im gleichen Grade wie die Gesetze der Mechanik. Im Gegensatz zu ihm sieht Boltzmann im zweiten Hauptsatz eine simple Aussage der statistischen Physik. Dieses Gesetz kann nach ihm in seltenen Fällen auch verletzt werden. Boltzmann schrieb in seinem Vortrag 1904 in St Louis U.S.A.: "Genauer präzisiert wird dies durch den so genannten zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. Derselbe sagt aus, dass wenn ein beliebiges System von Körpern sich selbst überlassen und nicht von anderen Körpern beeinflusst ist, immer der Sinn angegeben werden kann, in dem jede Zustandsänderung sich abspielt. Es lässt sich nämlich eine gewisse Funktion des Zustandes sämtlicher Körper, die Entropie, angeben, welche so beschaffen ist, dass jede Zustandsänderung nur in dem Sinne vor sich gehen kann, welcher ein Wachstum

dieser Funktion bedingt. Dieses Gesetz ist freilich nur durch Abstraktion gewonnen, wie das galileische Prinzip; dann es ist unmöglich, ein System von Körpern in aller Strenge dem Einfluss aller übrigen zu entziehen. Aber da es mit den übrigen Gesetzen zusammen bisher immer richtige Resultate ergeben hat, so halten wir es für richtig, wie das nicht anders beim galileischen Prinzip zutrifft, [4]. Aus dieser Situation zieht Boltzmann die Schlussforderung: "dass jedes abgeschlossene System von Körpern endlich einem bestimmten Endzustand zustreben muss, für welchen die Entropie ein Maximum ist, [4]. Boltzmann zieht zuerst eine mathematische Konsequenz; "Da in den Differentialgleichungen der Mechanik selbst absolut nichts dem zweiten Hauptsatz Analoges existiert, so kann derselbe nur durch Annahmen über die Anfangsbedingungen in der Mechanik dargestellt werden. Um die hier tauglichen Annahmen zu finden, müssen wir bedenken, dass wir behelfs Erklärung kontinuierlich scheinende Körper voraussetzen müssen, dass von jeder Gattung von Atomen oder allgemeiner, mechanischen Individuen außerordentlich viele in den mannigfaltigsten Anfangslagen befindliche vorhanden sein müssen.

Um diese Annahme mathematisch zu behandeln, wurde eine eigene Wissenschaft erfunden, welche nicht die Aufgabe hat, die Bewegungen eines einzelnen mechanischen Systems, sondern die Eigenschaften eines Komplexes sehr vieler mechanischer System zu finden, die von dem mannigfaltigsten Anfangsbedingungen ausgehen." [4] Boltzmann sieht als den Begründer dieser neuen Wissenschaft den amerikanischen Theoretiker W. Gibbs, Professor am Yale College. Gibbs nannte diese neue Wissenschaft die statistische Mechanik und unterschied die statistische Statik und die statistische Dynamik. Letztere berechnet die allmählichen Änderungen eines Komplexes sehr vieler mechanischer Individuen welche in Bewegung sind ohne ein statisches Gleichgewicht im Mittel zu erreichen. Die statistische Mechanik basiert auf der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Damit ist ein grundsätzlich neues Konzept in die theoretische Physik eingebracht worden. Boltzmann verband diese neue Blickweise mit der im 19ten Jahrhundert formulierten thermodynamischen Theorie in welcher eine Beschreibung der nicht genau bekannten Zustände eines mechanischen System von sehr vielen Freiheitsgraden nur statistisch möglich erschien. Phänomene wie zB die Wärmeleitung, die Brownsche Bewegung, die Radioaktivität schienen allesamt einer Erklärung durch deterministische Gesetze zu widerstehen.

Planck blieb trotzdem bei seiner Auffassung, nur wahrscheinlichkeitsfreie deterministische Formulierungen als Naturgesetze zu akzeptieren treu und diese Überzeugung führte zu einer Kontroverse mit Boltzmann. Aus heutiger Sicht sind die Grundannahmen Plancks und Boltzmanns inkommensurabel. Der erste hält an der unbedingten Wahrheit der deterministischen Naturgesetze und der auf ihnen beruhenden Messungen fest, während Boltzmann Ausnahmen, wenn auch im geringer Anzahl, von diesen Gesetzen mit Rücksicht auf die geringe Zahl der aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung ausscheerenden Phänomene annahm. In der Thermodynamik ist die Messung der Bewegungszustände der einzelnen Moleküle nicht möglich und es ist nur möglich Messdaten z.B. gemessene Temperaturen durchschnittlichen Wertverteilungen molekularer Zustände zuzuordnen. Nun können aber viele unterschiedliche Verteilungen der Einzelwerte den gleichen Durchschnittswert ergeben. Als Konsequenz kann dann aus einem gemessenen Durchschnittswert nur auf eine Menge von vorliegenden Zuständen geschlossen werden. Damit wird es aber nicht mehr möglich zwischen Anfangs- und Endzuständen eine eindeutige Relation festzustellen. Planck

sieht in diesem Sachverhalt, wie er sagt, das "vornehmste Opfer, in der Thermodynamik nach Boltzmann'schen Ansatz, der für ihn „in Verzicht auf eine wirklich vollständige Beantwortung aller auf die Einzelheiten eines physikalischen Vorganges bezüglichen Fragen". Diese Tatsache ist auch eine Verwässerung des Konzeptes der Kausalität. Für Planck galt als unbedingte Wahrheit, dass ein Ereignis nur dann kausal bedingt ist, wenn es mit Sicherheit vorausgesagt werden kann.

Aber er weiss auch, dass es in keinem einzigen Fall möglich ist ein physikalisches Ereignis genau vorauszusagen. [3] Damit schwenkt er in die Denkrichtung von Poincaré ein, der in einem seiner letzten Aufsätze schreibt: [5] "Selbst wenn die Naturgesetze für uns kein Geheimnis mehr enthalten, können wir doch den Anfangszustand immer nur näherungsweise kennen. Wenn wir dadurch in den Stand gesetzt werden den späteren Zustand mit demselben Näherungsgrade vorauszusagen, so ist das alles was man verlangen kann...Es kann (aber) der Fall eintreten, dass kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen grosse Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen... (In diesem Falle) würde die Voraussage unmöglich und wir haben eine zufällige Erscheinung". Das ist ebenso sehr ein Ausblick auf chaotische Lösungen nicht linearer Differentialgleichungen dem sich Planck durchaus bewusst war. Planck legt sich seinen Kompromiss in dieser Frage zurecht, indem er annahm, dass Kausalität in der realen Welt streng gelten kann, in der Physik des physikalischen Weltbildes jedoch nur approximativ. Diese Überlegung erlaubte es ihm, Boltzmanns Einführung der statistischen Gesetze nachzuvollziehen und auch dem Begriff der Entropie diesen Status zu verleihen.

Plancks Hauptinteresse galt weiterhin der Thermodynamik und hier stützte er sich mindest soviel auf Clausius denn auf Boltzmann. Ersterer hatte 1864-1867 seine "Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie, publiziert, zur Zeit also wo Planck erst 14 Jahre alt war. Die Thermodynamik entwickelte sich zu einer abstrakten quantitativ ausgerichteten Theorie zur Beschreibung der Wärme und ihrer Rolle in makroskopischen physikalischen Prozessen, war also eine relativ neue Wissenschaft als ihr Planck zuerst in den 1870er Jahren begegnete. Erst 30 Jahre zuvor wurden zahlreiche, thermische, chemische, elektrische und mechanische Effekte als Prozesse, welche qualitativ irreversibel waren, erkannt. Es wurde bald ein Zusammenhang mit dem Prinzip der Erhaltung der Energie hergestellt welchem eine immer grössere Wichtigkeit zukam und ihm einen A-priori Status in der Naturphilosophie verschaffte. Die Erhaltung der Energie wurde 1824 von Sadi Carnot erkannt und der zweite Hauptsatz wurde bald danach, wenn auch nicht ohne Diskussionen abgeleitet. Carnot hatte in seinem Werk: "*De la puissance motrice du feu*", [6], obschon auf falschen Voraussetzungen basierend, eine Reihe von Sätzen angegeben. Er setzte die Wärme gleich einem Fluidum, welches bei seiner Bewegung Arbeit produziert, wenn es sich von einem Behälter von höherer Temperatur zu einem mit niedrigerer Temperatur begibt. Carnots Gedanken wurden in den 1840er Jahren neu aufgegriffen und auf dem Hintergrund des Energieerhaltungsprinzips neu interpretiert. Die Inkommensurabilitätssituation zwischen seiner Wärmetheorie und der modernen auf die Atomistik gegründete wurde 1850 von Clausius durch eine neue Ableitung seiner Erkenntnisse behoben.

Diese setzte jedoch die Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik als neues physikalisches Prinzip voraus und damit die Unmöglichkeit des Perpetuum Mobiles zweiter Art. Clausius brachte es in die Form, dass Wärme nicht aus eigener Kraft von einem kälteren zu einem

wärmeren Körper sich bewegen könne, wenn dieser Prozess nicht Konsequenzen auf das ganze Universum haben sollte. Zu gleicher Zeit gab W. Thomson dem neuen Prinzip folgende Form: "Es ist unmöglich eine Maschine zu bauen, welche fähig ist ein Gewicht zu heben mit der aus der Kühlung eines Wärmereservoirs gewonnenen Kraft," [2]. Planck beschäftigte sich ausgiebig mit der zweiten Auflage von Clausius Buch: "Die mechanische Wärmetheorie," [7], wie er in seiner Selbstbiographie hervorhebt. [8] Dort schreibt er "In dem Bestreben mir über diesen Punkt (den zweiten Hauptsatz) möglichst Klarheit zu schaffen, kam ich auf eine Formulierung der Hypothese die mir einfacher und bequemer zu sein schien. Sie lautet: Der Prozess der Wärmeleitung lässt sich auf keinerlei Weise vollständig rückgängig machen,". Damit ist dasselbe ausgedrückt wie durch die Clausiusische Fassung, ohne das es einer besonderen Erläuterung bedarf. Dieses war auch die Plancksche Definition für einen irreversiblen Prozess. Einige Zeilen weiter schreibt er, dass die Natur "sozusagen eine grössere Vorliebe," für die Abhängigkeit einer Differentialgleichung vom Anfangszustand auszeichnet. Und er fährt fort: „Als ein Mass für die Grösse dieser Vorliebe ergab sich mir die Clausiusische Entropie und als Sinn des zweiten Hauptsatzes das Gesetz, dass bei jedem Naturvorgang die Summe der Entropien aller an dem Vorgang beteiligten Körper zunimmt [8]. Dieses war die Plancksche Begründung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik ohne Rückgriff auf Boltzmannsche Gedankengänge.

II

Es soll jetzt eine detaillierte Analyse und Begründung der Begriffe der Reversibilität und Irreversibilität durchgeführt werden. Sie soll zuerst auf der Interpretation des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik, der in der Formulierung von Planck und Thomson ein Erfahrungssatz ist, beruhen. Er kann also nur durch die Erfahrung bestätigt oder widerlegt werden. Nun sind aber dessen Folgerungen ausserordentlich zahlreich und die experimentelle Bestätigung dieser Folgerungen ist zugleich als Beweis für die Gültigkeit dieses zweiten Hauptsatzes anzusehen. Ausserdem gibt es keinen Widerspruch zwischen der makroskopischen und der atomistischen Auffassung dieses Satzes.

Die erste Folge ist, dass eine Reihe von Energieumwandlungen bei denen die Wärme im Spiel ist, nicht umkehrbar ist. Dazu gehört die Verwandlung von Arbeit in Wärme durch Reibung. Ein anderer irreversibler Vorgang ist die isotherme Expansion eines idealen Gases ohne äussere Arbeitsleistung. Durch Umgehung dies Vorganges wäre es natürlich möglich ohne Aufwand äusserer Arbeit ein Gas isotherm auf ein kleineres Volumen zu bringen und auf diese Art ein Perpetuum mobile zweiter Art zu konstruieren, indem man ein Gas erst unter Leistung äusserer Arbeit sich isotherm entspannen lässt, wobei die benötigte Energie als Wärme einem Behälter entnommen wird, das dann mit Hilfe des beschriebenen Prozesses ohne Aufwand von Arbeit wieder auf das alte Volumen komprimiert wird. Vom atomistischen Standpunkt aus gesehen ist die Konsequenz dieser Unmöglichkeit, dass sich nur ein Übergang von der Ordnung zur Unordnung geben kann und nicht das Gegenteil. Es soll jetzt der zweite Hauptsatz auf eine mathematische Form gebracht werden, mittels derer auf rechnerischem Wege weitere Folgerungen gezogen werden können. Parallel zum ersten Hauptsatz, wo nur die Energie von den Zustandsvariablen abhängt, soll auch für den zweiten Hauptsatz eine charakteristische Funktion gefunden werden, welche ähnliche Eigenschaften besitzt. Ausgangspunkt für die Suche ist der Carnotsche Kreisprozess für den gilt:

(2.1)

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = \sigma \quad \text{oder} \quad \frac{Q_2}{T_2} - \frac{\bar{Q}_1}{T_1} = \sigma$$

Vom Standpunkt der Umgebung aus gesehen ist die Wärme nicht mehr verwertbar und die Arbeit kann nur durch die Wärme gewonnen werden. Der Wirkungsgrad des Carnotschen Kreisprozesse hängt also nur von den Temperaturen ab und wächst bei einem idealen Gas mit steigender Betriebstemperatur, bleibt aber stets kleiner als 1.

(2.2)

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1}$$

Dem Wärmebehälter mit der Temperatur wird eine gewisse Menge von Wärmeenergie entzogen, dem Wärmebehälter eine gewisse Wärmemenge zugeführt und ausserdem eine gewisse mechanische Arbeit geleistet. Die geleistete Arbeit wird im Carnot Diagramm durch den Flächeninhalt der in diesem Kreisdiagramm umlaufenden Fläche dargestellt. Da sich die Arbeit auf den Adiabaten geleisteten Beiträge aufheben, bleibt:

(2.3)

$$A = RT_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) + RT_3 \ln\left(\frac{v_4}{v_2}\right)$$

Mit den Relationen:

(2.4)

$$v_3 = v_1 \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} = v_2 \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} ; \quad (T_2 = T_1)$$

$$v_4 = v_1 \left(\frac{T_4}{T_1}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} = v_1 \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} ; \quad (T_4 = T_2)$$

Aus dem Gleichungen (2.4) folgt:

(2.5)

$$\frac{v_4}{v_3} = \frac{v_1}{v_2}$$

Und damit wird:

(2.6)

$$A = R \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \cdot (T_1 - T_2)$$

Andererseits ist dem ersten Behälter die Wärmemenge:

(2.7)

$$Q_1 = RT_1 \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

als Äquivalent der beim ersten Teilprozess geleisteten Arbeit entzogen und der Carnot Maschine zugeführt worden. Davon ist ein Bruchteil:

(2.8)

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1}$$

in mechanische Arbeit verwandelt worden, während die Wärmemenge:

(2.9)

$$Q_2 = RT_3 \ln \left(\frac{v_3}{v_1} \right) = Q_1(1 - \eta)$$

an den zweiten Wärmebehälter übergang. Der Wirkungsgrad der Maschine beträgt also η .

Damit kann die oben gegebene Formulierung des zweiten Hauptsatzes auch geschrieben werden: „Es ist nicht möglich eine periodisch arbeitende Maschine zu bauen, die nichts anderes bewirkt als Erzeugung mechanischer Arbeit und Abkühlung eines Wärmespeichers“. Auch diese Formulierung geht dahin, die Existenz des Perpetuum mobile 2ter Art auszuschließen.

Es soll vorausgesetzt werden, dass alle Zustandsänderungen im Carnot Prozess reversibel sind und beliebige Kreisprozesse sich mit beliebig guter Näherung in infinitesimale Carnot Prozesse zerlegen lassen. Nach Beendigung dieses verallgemeinerten Kreisprozesses ist das betrachtete System, ebenso wie die Carnot Maschine in den Ausgangszustand zurückgekehrt und es gilt die verallgemeinerte Formel:

(2.10)

$$Q_0 = T_0 \cdot \sum \frac{\Delta Q_\tau}{T_\tau}$$

welche durch Summation über alle Wärmeübertragungen gewonnen wird. Im Grenzfall sehr kleiner Schritte tritt an Stelle der Summe das Integral,

$$\oint \frac{dQ_\tau}{T_\tau}$$

so dass für einen geschlossenen Prozess die Beziehung:

(2.11)

$$Q_0 = T_0 \oint \frac{dQ_\tau}{T_\tau}$$

entsteht. Wenn Q_0 negativ ist, bedeutet das, dass dem Wärmespeicher unter Vernichtung mechanischer Energie Wärme zugeführt wird. Ein positiver Wert von Q_0 drückt aus, dass dem Wärmespeicher Wärmeenergie entzogen wurde, um entweder in der Carnot Maschine oder dem verallgemeinerten Kreisprozess in Arbeit verwandelt zu werden. Das würde jedoch die Existenz eines Perpetuum mobiles 2ter Art bedeuten. Bestenfalls also kann Q_0 bei vollkommen reversibler Leistung gleich Null sein. Damit müsste das Integral

$$\oint \frac{dQ_\tau}{T_\tau}$$

vom Weg unabhängig sein. Das Integral verschwindet über zwei Kurven zwischen den Werten 1 und 2 durch Richtungs-umkehr und definiert damit einen Kreisprozess. Es wird nun das von einem unbestimmten Integral

$$\int \frac{dQ_{\tau(rev)}}{T_\tau}$$

bestimmter Wert als Entropie S des Systems ausgewiesen.

(2.12)

$$S = \int \frac{dQ_{\tau(rev)}}{T_\tau}$$

Bei einem reversibel geleisteten Übergang des Systems aus einem Zustand 1 in einen Zustand 2 ist also:

(2.13)

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ_{\tau(rev)}}{T}$$

Nun gilt bei einer irreversiblen Zustandsänderung das Gleichheitszeichen nicht mehr. In einem irreversiblen Prozess stellt die positive Differenz:

(2.14)

$$S_2 - S_1 - \int_1^2 \frac{dQ_{\tau(rev)}}{T} > \sigma$$

ein Mass für diese Irreversibilität des gegebenen Prozesses dar. Alle in einem abgeschlossenen System auftretenden Zustandsänderungen verlaufen so, dass die Entropie zunimmt. Ein abgeschlossenes System wird daher solange Zustandsänderungen unterworfen sein, bis die Entropie einen Höchstwert erreicht hat.

Die Besonderheit an der differentiellen Formulierung der Fundamentalgleichung der Thermodynamik ist, dass sie linear ist und die notwendige Nichtlinearitäten über Ungleichungen für den Wert der Entropie eingebracht werden. Dabei bleibt die ganze mathematische Beschreibung rein phänomenologisch. Planck, in seinen Vorlesungen an der Columbia University in 1909 stellt zuerst die Thermodynamik vor und versucht durch konkrete Beispiele den zweiten Hauptsatz zu illustrieren. Er betrachtet zuerst das Gleichgewicht eines materiellen Systems, welches beliebig viele Freiheitsgrade besitzt ebenso wie es beliebig vielen Phasen unterworfen ist, bei einer gegebenen Temperatur und einem gegebenen Druck. Wenn dieses System komplett isoliert ist, und deshalb von allen externen thermischen und mechanischen Einwirkungen abgeschirmt ist, dann kann die Entropie in diesem System nur zunehmen:

(2.15)

$$dS > \sigma$$

Diese Situation führt zum generellen Zustand:

(2.16)

$$dS + dS_0 > \sigma$$

Mit:

(2.17)

$$dS_0 = -\frac{Q}{T}$$

W_0 Q die Wärmemenge bezeichnet, welche aus der Umgebung des Systems kommt. Wenn andererseits U die Energie bezeichnet, V das Volumen des Systems, dann ergibt der 1ste Hauptsatz der Thermodynamik:

(2.18)

$$Q = dU + pdV$$

Durch die Substitution

(2.19)

$$dS - \frac{dU + pdV}{T} > 0$$

und, weil p und T konstant sind:

(2.20)

$$d\left(S - \frac{U + pV}{T}\right) > 0$$

(3.5)

$$N! \cong \left(\frac{N}{e}\right)^N$$

Wenn man jetzt:

(2.21)

$$S - \frac{U + pV}{T} = \phi$$

setzt, dann ergibt sich:

(2.22)

$$d\phi > 0$$

ϕ ist additiv über sämtliche Phasen und erlaubt es, wenn der Ausdruck in als bekannte Funktion der unabhängigen Variablen für jeden Phasenzustand bekannt ist, so ist die Evolution des Systems bekannt und die Frage nach der Stabilität ist beantwortbar.

Aus diesen Grundgleichungen leitet Planck Resultate für eine grössere Menge von Spezialfällen ab und zeigt damit die gesamte Breite der thermodynamischen Theorie. Diese sind zum Teil das Resultat einer Weiterführung von Plancks Überlegungen aus seiner Promotionsarbeit und seiner Habilitationsschrift.

III

L. Boltzmann führte eine mikroskopische Betrachtung der molekularen Vorgänge ein, indem er eine ganz allgemeine Beziehung als Brücke zur Thermodynamik und der statistischen Physik zum Zentrum seiner Betrachtungen machte und daraus eine grosse Anzahl von Folgerungen ableitete. Er zeigte, dass ein enger Zusammenhang bestehen muss, zwischen der Entropie eines Systems in einem bestimmten Zustand und der Wahrscheinlichkeit es in diesem Zustand anzutreffen. Die Wahrscheinlichkeit dafür, bei zwei betrachteten Systemen, das eine in einem, das andere in einem anderen angegebenen Zustand zu treffen ist nach den Grundsätzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung gleich dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten. Es gilt also:

(3.1)

$$S_{12} = S_1 + S_2$$

(3.2)

$$W_{12} = W_1 + W_2$$

Es muss also eine Funktion bestimmt werden, welche folgende Bedingung erfüllt :

(3.3)

$$f(x_1, x_2) = f(x_1) + f(x_2)$$

Offenbar tut dies die Funktion, und Boltzmann setzte:

(3.4)

$$S = R \ln W$$

(3.4) ist die berühmte Boltzmannsche Gleichung, welche zu den wichtigsten Beziehungen der ganzen Physik gehört. Die Proportionalitätskonstante k wird sich als Gaskonstante pro Molekül also zu R/L ergeben. Die Wahrscheinlichkeit W eines thermodynamischen Zustandes ist, im Gegensatz zur Wahrscheinlichkeitsrechnung, als die Zahl der günstigen Fälle definiert. Die thermodynamische Wahrscheinlichkeit ist also eine grosse Zahl.

Bei der Abzählung dieser Anzahl von günstigen Fällen tritt, wie immer in der Kombinatorik der Ausdruck $N!$ auf. Nun gibt es bei grossen Zahlen eine Näherungs Formel für grosse N :

Boltzmann schlägt auf diese Weise eine Brücke zwischen der Darstellung einer jeden Art von Materie als ein mechanisches Systems, das aus einer sehr grossen Zahl von Komponenten besteht, wobei in ersten Näherung die Gesamtenergie des Systems gleich der Summe der Gesamtenergien dieser Komponenten ist und dem Sinn und Zweck der statistischen Mechanik, als der Wissenschaft aus den allgemeinen Gesetzen der Mechanik spezielle Eigenschaften solcher aus vielen Molekülen bestehenden Systeme abzuleiten. Denn unter Benutzung geeigneter Grössen können aus der statistischen Mechanik die thermodynamischen Gesetze abgeleitet werden. Deshalb wird sie oft kritisiert, sie sei a priori mechanistisch. Dieser Einwand greift aber zu kurz. Die in der statistischen Mechanik benutzten allgemeinen Gesetze müssen notwendigerweise für beliebige Bewegungen der Materieteilchen gelten, aber die Art der Kräfte, die solche Bewegungen hervorrufen spielt dabei keine Rolle. Im Gegenteil, die Abstraktion von der Natur dieser Kräfte gibt der statistischen Mechanik einen besonderen Zug und verleiht ihren Ableitungen die notwendige Allgemeinheit, durch nicht Einbeziehung der Natur der betrachteten Teilchen. Hier liegt auch die Brücke zur phänomenologischen Thermodynamik, deren Probleme von der Formulierung von Ungleichheiten in den Anfangsbedingungen abhängen. Man weiss jedoch, dass die in dieser Art formulierten Sätze denjenigen der Wahrscheinlichkeitstheorie in den meisten Fällen gleichwertig sind. Boltzmann benutzte diese Analogien und die daraus zu entwickelnden Methoden erfolgreich.

Die statistische Mechanik ist nun eine Wissenschaft, deren wahrscheinlichkeitstheoretischer Charakter sich in zwei völlig verschiedenen und unabhängigen Zügen zeigt: in der allgemeinen Dynamik die ihre mechanische Grundlage bildet und in der Annahme einer grossen Zahl von Freiheitsgraden, die einer sehr weitreichenden Anwendung der wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden entspricht.

Die statistische Mechanik interessiert nicht nur die Lage, sondern auch die Geschwindigkeitsverteilung der Gasmolekülen im Gleichgewichtszustand zu kennen.

Es liegt nahe den wirklichen Raum in einen sechsdimensionalen Bildraum umzuwandeln, in welchem die rechtwinkligen Koordinaten eines Bildpunktes durch die drei Lagekoordinaten und die Geschwindigkeit durch drei Geschwindigkeitskoordinaten gegeben sind. Das kann durch die Einführung der Hamiltonschen Variablen:

$$q_1, \dots, q_s ; p_1, \dots, p_s$$

herbeigeführt werden. Die Bewegungsgleichungen des Systems nehmen dabei die "kanonische", Form an:

(3.6)

$$\frac{dq_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_i} ; \quad \frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_i} \quad (1 \leq i \leq s)$$

H ist die Hamiltonfunktion der $2s$ Variablen q_1, \dots, p_s wenn zeitunabhängig ist, wird das Integral der Gleichungen (3.6)

(3.7)

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \sum_1^s \frac{\partial H}{\partial q_i} \cdot \frac{dq_i}{dt} + \sum_1^s \frac{\partial H}{\partial p_i} \cdot \frac{dp_i}{dt} \\ &= \sum_1^s \frac{\partial H}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial H}{\partial p_i} - \sum_1^s \frac{\partial H}{\partial p_i} \cdot \frac{\partial H}{\partial q_i} = \sigma \end{aligned}$$

Die Abbildung erfolgt in einem dimensional euklidischen Raum, dessen Punkte durch die kartesischen Koordinaten q_1, \dots, p_5 bestimmt sind. Dann wird jedem möglichen Zustand des betrachteten mechanischen Systems ein eindeutig bestimmter Punkt des eingeführten Raumes entsprechen: der Bildpunkt im Phasenraum. Dieser Raumpunkt ist nicht unbeweglich und kann eine neue Lage einnehmen. Dabei geht jeder andere Punkt des Raumes auch in eine eindeutig bestimmte neue Lage über, das heisst der ganze Raum transformiert sich in sich selbst. Diese Transformation bildet eine einparametrische Gruppe welche die natürliche Bewegung definiert. Sie hängt während eines Zeitintervalls Δt nur von der Anfangslage des gewählten Punktes und von der Grösse des Zeitintervalls, nicht aber von der Wahl des Anfangszeitpunktes ab. So ist die natürliche Bewegung des Phasenraumes stationär, die Geschwindigkeiten der Punkte des Phasenraumes sind bei dieser Bewegung eindeutig von der Lage dieser Punkte abhängig und sie ändern sich zeitlich nicht. Die Bewegung des Bildpunktes im dimensional Phaseraum heisst Phasenfunktion, deren wichtigste die Hamilton Funktion ist. Durch die Vorgabe dieser Funktion werden die mechanischen Eigenschaften eines gegebenen Systems vollständig bestimmt. Nun befolgen aber die zu betrachtenden Teilchen die Grundgesetze der Mechanik, welche in Form der Hamilton Differentialgleichungen geschrieben werden können. Aus ihnen folgt das Verschwinden der Divergenz der Geschwindigkeiten, welches ein Merkmal für die Strömung einer inkompressiblen Flüssigkeit ist. Aus dieser Erkenntnis kann man schliessen, dass alle Teilchen welche sich in einem bestimmten Volumen befinden, nach einer Bewegung ein Volumen gleicher Grösse im Phasenraum einnehmen. Da mit der Zeit alle Phasenraumelemente von der aus den Hamiltongleichungen gefolgerten Strömung getroffen werden, kommt in der statistischen Lesart der Mechanik allen gleich grossen Elementen dieselbe a priori Wahrscheinlichkeit zu.

Diese Erkenntnis ist gleichzeitig sowohl eine Brücke zur klassischen Mechanik, als auch zur Quantenmechanik, wie Boltzmann das am Anfang rein intuitiv begriffen hat. Er begann Konzepte und Techniken zu entwickeln, um den Zustand gleicher Wahrscheinlichkeit berechnen zu können. Sein Ausgangspunkt war die nach ihm benannte Gleichung, sowie die schon vorhin erwähnte Liouvillesche Differentialgleichung. Der französische Mathematiker betrachtete, auch im Rahmen der klassischen Dynamik nicht die Bahnen der Teilchen eines Systems, sondern interessierte sich nur für ihre statistische Verteilung. Aus den Hamilton Gleichungen leitete er seine Differentialgleichung in der Form:

(3.8)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial p} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial q} + \frac{\partial H}{\partial q} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial p}$$

durch Einführung eines Operators und Multiplikation mit, erhält man:

(3.9)

$$i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L \rho$$

L ist ein linearer Operator der Form:

(3.10)

$$L = -i \frac{\partial H}{\partial p} \cdot \frac{\partial}{\partial q} + i \frac{\partial H}{\partial q} \cdot \frac{\partial}{\partial p}$$

Sobald bekannt ist, kann jeder Mittelwert einer mechanischen Grösse berechnet werden mit dem Ausdruck:

(3.11)

$$\langle A \rangle = \int dp dq A(p, q) \rho$$

Die Lösung der Liouville Gleichung (3.9) hat die Form:

(3.12)

$$\rho(t) = e^{-iLt} \cdot \rho(0)$$

Der Ausdruck (3.12) ist eine dynamische Gruppe, welche vollständig reversibel ist. Durch eine Einbettung in einen Hilbert Raum ist die formale Lösung der Liouville'schen Gleichung in der Form:

(3.13)

$$\rho(t) = \sum_{\lambda} |\varphi_{\lambda}\rangle e^{-i\lambda t} \langle \varphi_{\lambda} | \rho(0) \rangle$$

darstellbar, mit als Eigenfunktionen des Liouville Operators. Der Ausdruck (3.13) ist eine Wahrscheinlichkeitslösung in den Regeln der klassischen Dynamik. In einfachen Fällen sind Eigenwerte und Eigenfunktionen von (3.13) analytisch bestimmbar. Ist dieses in komplexeren Fällen nicht mehr der Fall, so können trotzdem Existenzsätze abgeleitet werden.

In der Quantenmechanik ist die fundamentale Grösse die Amplitude, welche durch die Schrödingergleichung:

(3.14)

$$i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H_{op} \cdot \psi$$

bestimmt wird. Diese Gleichung ersetzt die Hamiltoniengleichung (3.6). H_{op} ist der Hamiltonoperator, in welchem die klassischen Variablen durch Operatoren ersetzt wurden:

(3.15)

$$q \rightarrow q_{op} \quad ; \quad p \rightarrow p_{op} = \frac{1}{i} \cdot \frac{\partial}{\partial q}$$

Die Geschwindigkeiten P werden zu Ableitungen der Lagekoordinaten und passen damit in die Theorie der Hilbert Räume. H_{op} wird zu einem Hermiteschen Operator. Die Gleichungen (3.14) und (3.9) haben die gleiche Form. Das Eigenwertproblem in der Quantenmechanik führt zum Ausdruck:

(3.16)

$$H_{op} / u_n = E_n / u_n$$

mit den E_n als Energieebenen des Systems, die entweder ein diskretes oder kontinuierliches Spektrum besitzen. Die Energieniveaus sind reelle Zahlen und die Eigenfunktionen bilden ein vollständiges Orthonormalsystem. Die Wellenfunktion schreibt sich in der benutzten Notation für die Anfangsbedingung zum Zeitpunkt $t=\sigma$:

(3.17)

$$\psi(0) = \sum_n |u_n\rangle \langle u_n | \psi(\sigma) \rangle$$

daraus wird dann:

(3.18)

$$\psi(t) = U(t) \cdot \psi(\sigma) = \sum_n C_n e^{-iE_n H / \hbar} |u_n\rangle$$

Genau wie in der klassischen Dynamik, kann (3.18) wahrscheinlichkeits-theoretisch interpretiert werden, wenn ψ als Amplitude dieser Wahrscheinlichkeit angesehen wird. σ muss dann lediglich als Produkt von ψ mit seinem adjungierten Operator angenommen werden.

Die Grösse σ genügt der Gleichung:

$$(3.19) \quad i \frac{\partial \rho}{\partial t} = H\rho - \rho H$$

welche das quantenmechanische Analogon von (3.8) ist und auch in der Form:

$$(3.20) \quad i \frac{\partial \rho}{\partial t} = L\rho$$

geschrieben werden kann. Im Falle integrierbarer Systeme, solcher wo das Eigenwertproblem lösbar ist, sind die Formulierungen (3.14) und (3.20) gleichwertig. Ist dies nicht mehr der Fall, sind die Eigenwerte von L nicht auf das Produkt von H und der Eigenwerte der Differenzen reduzierbar, öffnet sich der weite Raum des Quantenchaos, der wieder mit dem Chaos in der klassischen Dynamik zusammenhängt. Es soll aber jetzt der lange Ausblick von der zentralen Stellung der Gleichung (3.8) aus beendet werden, ohne näher auf die Chaostheorie einzugehen.

Boltzmann hatte den Ausgangspunkt seiner Betrachtung der materiellen Realität weit umfassender gewählt. Eine Grundfrage für ihn war eine Antwort auf die Fragestellung, ob die Materie kontinuierlich oder ob sie aus diskreten Bestandteilen, auch aus sehr vielen, wenn auch nicht unendlich vielen, zusammengesetzt zu denken ist. Wie Boltzmann zugibt, ist dies eine der schwierigen Fragen, welche das Grenzgebiet der Philosophie und der Physik berühren. Sie kann nicht diskutiert werden, ohne nach dem Wesen des Kausalgesetzes, der Materie und der Kraft zu fragen und Boltzmann will diese grundsätzlichen Fragen im Prinzip der Philosophie zur Beantwortung zuweisen.

Er ist aber auch überzeugt davon, dass eben jene Fragen, immer weiter an Wichtigkeit gewinnen: „So ist die Gesetzmässigkeit des Naturgeschehens die Grundbedingung aller Erkennbarkeit: daher wird die Gewohnheit bei allen nach der Ursache zu fragen, zum unwiderstehlichen Zwange und wir fragen auch nach der Ursache warum alles eine Ursache hat“ [9]. Boltzmann stösst durch diese Überlegungen an die Grundfesten des Kausalgesetzes und er bricht diese Fragekette von selbst ab: „Wir schießen über das Ziel hinaus, wenn wir nach dem Werte des Lebens selbst fragen,“ [9]. Auch in der immer weitergehenden Zergliederung der einfachsten Begriffe muss eine Grenze gesetzt werden, weil der Mensch nicht die ganze Natur nach seinen Begriffen ableiten kann. Er muss vielmehr die letzteren den ersteren anpassen, da es nicht möglich ist zu glauben, dass sich alles nach rein menschlichen Kategorien einstellen lässt, wobei diese Einteilung vollkommen sein. Boltzmanns Schluss geht dahin, dass der Naturwissenschaftler nur vom Gegebenen ausgehen kann, andererseits aber auch bei der Bildung und Verbindung seiner Begriffe keine andere Rücksicht kennen sollte, als das Bestreben, einen möglichst adäquaten Ausdruck des Gegebenen zu erhalten.

Er macht aus dieser Maxime sein Werkzeug für die Behandlung der mannigfaltigen Tatsachen der Wärmetheorie, der Chemie und der Kristallographie, darauf hin, „dass in den, dem Anscheine nach kontinuierlichen Körpern keineswegs der Raum unterschiedslos und gleichförmig mit Materie erfüllt ist, sondern dass sich darin ungemein zahlreiche Einzelwesen, die Moleküle und Atome befinden, welche zwar ausserordentlich aber nicht im mathematischen Sinne unendlich klein sind,“ [3]. Diese Theorie der Atomistik erlaubte alle Erscheinungen der Strahlentheorie, die zu Boltzmanns Zeiten im Mittelpunkt des Interesses standen,

zu erklären. Sie taugte viel besser zur Erklärung der neuen Tatsachen, bot Anregung zu neuen Experimenten und gestattete bisher unbekannte Erscheinungen vorauszusagen. Die atomistische Theorie wurde jedoch auch in die Elektrizitätslehre eingeführt und besass daneben ein grosses Potential von Möglichkeiten, Neues über die Natur und Beschaffenheit der Atome zur erkennen und gleichzeitig eine Verbindung zur Thermodynamik herzustellen, wie es Planck ja auch getan hat in seiner Untersuchung der Strahlung des schwarzen Körpers. Die Zusammensetzung der materiellen Körper bleibt immer noch den allgemeinen Gesetzen der Mechanik unterworfen. Die statistische Mechanik trägt dieser Annahme Rechnung, indem sie der Naturerklärung den Inbegriff einer ausserordentlich grossen Zahl sehr kleiner, in stetiger Bewegung begriffener, den Gesetzen der Mechanik unterworfenen Urindividuen wählt. Boltzmann schreibt über die Konsequenzen dieser Annahme: „Die Grundgleichungen der Mechanik ändern ihre Form nicht im mindesten, wenn man darin bloss das Vorzeichen der Zeit umkehrt. Alle rein mechanischen Vorgänge können sich daher in dem einen Sinne genau so, wie im entgegengesetzten, im Sinne der wachsenden Zeit genau so, wie im Sinne der abnehmenden abspielen. Nun bemerken wir aber schon im gewöhnlichen Leben, dass Zukunft und Vergangenheit keineswegs sich so vollkommen decken, wie die Richtung nach rechts und die nach links, dass vielmehr beide deutlich voneinander verschieden sind“ [3]. Er bringt aber auch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik in seine Überlegungen hinein und er formuliert ihn in folgender Weise: „Derselbe sagt aus, dass, wenn ein beliebiges System von Körpern sich selbst überlassen und nicht von anderen Körpern beeinflusst ist, immer dem Sinn angegeben werden kann, in dem jede Zustandsänderung sich abspielt. Es lässt sich natürlich eine gewisse Funktion des Zustandes sämtlicher Körper: die Entropie angeben, welche so beschaffen ist, dass jede Zustandsänderung nur in den Sinne vor sich gehen kann, welcher ein Wachstum dieser Funktion bedingt, so dass dieselbe mit wachsender Zeit nur wachsen kann. Dieses Gesetz ist freilich nur durch Abstraktion gewonnen, wie das galiläische Prinzip; denn es ist unmöglich, ein System von Körpern in aller Strenge dem Einflusse aller übrigen zu entziehen. Aber da es mit den übrigen Gesetzen zusammen bisher immer richtige Resultate ergeben hat, so halten wir es für richtig, wie dies nicht anders beim galiläischen Prinzip zutrifft,“ [3]. Jedes abgeschlossene System von Körpern muss also einem bestimmten Endzustande zustreben, für welche die Entropie ein Maximum ist. Als Konsequenz dieser Forderung ergibt sich, dass die gesamte Welt einem Endzustande sich annähern muss, wo alles Geschehen aufhört. Allein diese Konsequenz ist selbstverständlich, wenn man die Welt als endlich annimmt und sie als dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik unterworfen betrachtet. Sollte jedoch die Welt unendlich sein, treten die aus dieser Situation entstehenden logischen Schwierigkeiten ein, es sei denn man betrachtet die Unendlichkeit als bloss potenziell.

Boltzmann steht jetzt vor dem Problem, dass die Differentialgleichungen der statistischen Mechanik nicht dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik Rechnung tragen können. Nur durch die Analyse von Anfangsbedingungen kann die Menge der anfangstauglichen Werte festgelegt werden. Aber auch hier gibt es prinzipielle Schwierigkeiten da diese Menge nur mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung festgelegt werden kann.

Trotzdem bleiben die Lehrsätze der statischen Mechanik Folgerungen der wahrscheinlichkeitstheoretisch gemachten Annahmen und sind streng gültig wie alle wohlbegründeten mathematischen Lehrsätze. Man schliesst aus ihnen, dass geordnete Bewegung immer mehr in eine ungeord-

nete übergeht, die Mischung der verschiedenen Stoffe sowie der verschiedenen Temperaturen, der Stellen mehr oder minder lebhafter Molekularbewegung, muss eine immer gleichförmigere werden. Boltzmann zieht aus dieser mathematisch bewiesenen Situation eine philosophische Konsequenz; "Dass diese Mischung nicht schon von Anfang an eine vollständige war, dass die Welt vielmehr von einem sehr unwahrscheinlichen Anfangszustand ausging, das kann man zu den fundamentalen Hypothesen der ganzen Theorie zählen und man kann sagen, dass der Grund davon ebenso wenig bekannt ist, wie überhaupt der Grund, warum die Welt gerade so und nicht anders ist...[3] Aber es gibt noch einen zweiten Standpunkt den man einnehmen kann. Boltzmann ist überzeugt davon "dass Zustände grosser Entmischung, respektive grosser Temperaturunterschiede nach der Theorie nicht absolut unmöglich, sondern nur äusserst unwahrscheinlich sind, allerdings in einem geradezu unfassbar hohen Grade. Wenn wir uns daher die Welt nur als gross genug denken, so werden nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung selbst bald da, bald dort, Stellen von den Dimensionen des Fixsternhimmels mit ganz unwahrscheinlicher Zustandsverteilung auftreten. Sowohl bei ihrer Bildung, als auch bei ihrer Auflösung wird der zeitliche Verlauf einseitiger sein, wenn sich also denkende Wesen an einer solchen Stelle befinden, so müssen sie von der Zeit genau denselben Eindruck gewinnen, den wir haben, obwohl der zeitliche Verlauf für das Universum als Ganzes kein einseitiger ist...[10]. Für Boltzmann ist nicht nur die Thermodynamik sondern auch die Physik des Universums statistisch.

IV

Boltzmann war der einzige Physiker welcher sich am Ende des 19ten Jahrhunderts mit der Theorie der Irreversibilität, noch vor Planck, beschäftigt hat. 1872 erschien seine Arbeit mit den Titel: "Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen"[11] in den „Wiener Berichten“. Der Aufsatz forderte manche Kritik heraus und die Antworten Boltzmanns bemühten sich, seine Theorie immer besser zu begründen. Es kam zu Überschneidungen mit Plancks Forschungen über schwarze Körper, welche einen tiefgreifenden Umbau der theoretischen Physik einläuteten. So formulierte Boltzmann sein H-Theorem, welches ein Beweis mittels der statistischen Mechanik bot, dass ein Gas in einen Gleichgewichtszustand aus jedem freigewählten Anfangszustand gelangt. Er musste jedoch zusätzliche Erklärungen einfügen und stiess auf den Begriff der "molekularen Unordnung", den er als zentral in seiner Beweiskette ansah. Diese ist wohl am vollständigsten in seinen "Vorlesungen über Gas-Theorie...[12] dargestellt. Boltzmann fragt zuerst seine Leser sich ein Gefäss vorzustellen, welches mit einem Gas aus elastisch sphäroiden Materieteilchen bestehend, aufgefüllt ist. Dann führt er eine Geschwindigkeitsfunktion f sowie die Zeit t ein. $f(u,v,w,t)dudvdw$ definiert die Geschwindigkeitsverteilung zur Zeit t zwischen u und $u+du$, v und $v+dv$. Die Geschwindigkeitsverteilung zu jedem Zeitpunkt der Moleküle im Behälter ist damit bestimmt. Zur Vereinfachung seiner Ideen führt Boltzmann noch folgende Hypothesen ein, welche er später nicht mehr benötigen wird: Die Moleküle sind keiner externen Kraft unterworfen und die Wände des Gefässes sind unendlich glatt und elastisch. Ausserdem soll das infinitesimale Volumen immer noch eine sehr grosse Anzahl von Molekülen enthalten. Alle Moleküle sollen, wie schon angegeben, Kugeln vom Durchmesser sein. Boltzmann untersucht nun den Zusammenstoss von zwei Körpern dieser Art, wobei einer in dem

Geschwindigkeitsintervall und der andere im Intervall liegt. Zu einer weiteren Spezifizierung des Zusammenstosses legt Boltzmann fest, dass die Verbindungslinie der betrachteten Moleküle im Moment des Zusammenstosses in einem infinitesimalen Kegel mit dem Winkel und gegebener Richtung liegt. Er bezeichnet alle Zusammenstösse dieser Art als "spezifisch...". Boltzmanns nächstes Problem besteht in der Evaluierung der Zahl der Zusammenstösse welche im Einheitsvolumen in dem Zeitintervall stattfinden. Er greift zu diesem Zwecke auf eine Methode zurück, welche von Clausius eingeführt wurde, zum Zwecke der Bestimmung der freien Weglänge der betrachteten Moleküle. Schliesslich berechnet er die Gesamtzahl der Zusammenstösse im Raumelement zur Zeit mittels der Formel:

(4.1)

$$d\gamma = f dw f_1 w_1 \tau^2 d\lambda g \cos \alpha dt$$

Das Resultat ist ein Mittelwert der Zusammenstösse, ob schon Boltzmann nicht zwischen Mittelwert und echter Anzahl der Zusammenstösse unterscheidet. Nach der Bestimmung der Anzahl pro Zeiteinheit der Zusammenstösse, wendet Boltzmann die Gesetze der Mechanik an, um die neuen Geschwindigkeitskomponenten vor und nach dem Zusammenstoss darzustellen. Diese besitzen eine grundlegende Eigenschaft welche geschrieben werden kann:

(4.2)

$$dw' \cdot dw'_1 = dw \cdot dw_1$$

Eine andere grundlegende Eigenschaft besagt: Ein Zusammenstoss zwischen Molekülen, welche sich am Anfang in den Elementen dw, dw_1 können diese nur in die Anfangselemente $dwdw_1$ zurück befördern. Boltzmann bezeichnet diese Zusammenstösse als solche "von inverser Art...". Sie vergrössern die Verteilungsfunktionen, während die normalen Kollisionen dieselben verkleinern. Schliesslich gelingt es Boltzmann eine allgemeine Änderung der Verteilungsfunktion anzugeben. Sie lautet:

(4.3)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \iint (ff'_1 - ff_1) \tau^2 \lambda g \cos \alpha dw_1 d\lambda$$

Die Formel (4.3) ist eine Sonderform der sogenannten Boltzmann Gleichung und gleichzeitig ein Zwischenschritt in der Ableitung des H Theorems. So benutzt Boltzmann die Gleichung (4.3) zum Beweis, dass die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung die einzig praktikable ist. Auch wenn seine mathematischen Argumente komplex scheinen, sind die Resultate einleuchtend. Er definiert zuerst eine Funktion $H(t)$ mittels der Gleichung:

(4.4)

$$H(t) = \int f \log f dw$$

und zeigt dann, dass:

(4.5)

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{1}{4} \iiint [\log(ff'_1) - \log(ff_1)] [ff'_1 - ff_1] \tau^2 g \cos \alpha dw dw_1 d\lambda$$

im Integranden dieser Gleichung sind die beiden Ausdrücke in eckigen Klammern entweder beide positiv, beide negative oder sie werden gleich null, so dass $\frac{dH}{dt} \leq 0$ wird. Das Gleichheitszeichen gilt nur wenn $ff'_1 = ff_1$ ist. Aus dieser Bedingung folgt leicht die Maxwell Verteilung. Die obigen Aussagen konstituieren Boltzmanns H-Theorem. Die Funktion aus (4.4) definiert für eine beliebige Anfangs-

bedingung, kann nur mit fortschreitender Zeit zu einem Minimum hinstreben. Wenn dieses Minimum erreicht ist, wird die Verteilung eine maxwellsche und diese bleibt dann erhalten. Boltzmann zeigt in den Anwendungen seines neu gefundenen Satzes, dass dieser sich in die anderen thermodynamischen Sätze der Gastheorie einpasst. Die Hauptfolgerung Boltzmanns lautet jedoch: "Es ist somit streng bewiesen, dass wie immer die Verteilung der lebendigen Kraft zu Anfang der Zeit gewesen sein mag, sie sich nach Verlauf einer sehr langen Zeit immer notwendig der von Maxwell gefundenen nähern muss"[2]. Die obige apodiktische Behauptung Boltzmanns ist jedoch zu weitgehend und rief sogleich Kritiker auf den Plan, die auf die, ihrer Meinung nach, zu kurz gekommenen Voraussetzungen des Satzes hinwiesen. So setzt die Gültigkeit des H Theorems diejenige der Boltzmann Gleichung voraus, die in Gegensatz zur klassischen Mechanik, nicht zeitumkehr invariant ist. Diese gilt aber nur, wenn zwischen Gasmolekülen keine Korrelationen bestehen. Diese Hypothese wird heute meist Hypothese vom molekularen Chaos genannt und dadurch sind auch eine ganze Anzahl von Anfangsbedingungen ausgeschlossen. Auch Max Planck beschäftigte sich mit dieser Fragestellung und sah sogleich ihre statistische Komponente. Er schreibt; "Die Grösse H kann auch einmal zunehmen. Auf diesen Punkt war Boltzmann bei der Ableitung seines sog. H-Theorems gar nicht eingegangen und ein talentvoller Schüler von mir, E. Zermelo, wies mit Nachdruck auf diesen Mangel einer strengen Begründung des Theorems hin. In der Tat fehlte in der Rechnung von Boltzmann die Erwähnung der für die Gültigkeit seines Theorems unentbehrlichen Voraussetzung der molekularen Unordnung. Er setzte sie wohl als selbstverständlich voraus. Jedenfalls erwiderte er dem jungen Zermelo mit beissender Schärfe, von der ein Teil mich selber traf, weil doch die Zermelosche Arbeit mit meiner Genehmigung erschienen war,"[3].

Die erste Kritik an Boltzmanns H-Theorem kam aber von Loschmidt, der den so genannten Umkehrinwand formulierte um damit den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik in Bezug auf den Wärmetod des ganze Universums in Frage zu stellen. So konstruierte er einen Anfangszustand der die Forderung des molekularen Chaos nicht erfüllt. Es handelt sich dabei um Moleküle, die in einer Linie senkrecht untereinander angeordnet sind und sich auch nur in dieser Richtung auf Grund ihrer ganzspeziellen Wärmebewegung und der Schwerkraft aufwärts oder abwärts bewegen. In dieser Konfiguration kommen immer wieder die gleichen Moleküle zum Zusammenstoss und es erfolgt keine Umschichtung der Energie und keine Zunahme der Entropie. In einem solchen Gas nimmt die Temperatur von oben nach unten zu und Loschmidt ist davon überzeugt ein Ausnahme des zweiten Hauptsatzes konstruiert zu haben. So schreibt er überzeugungsvoll: "Damit wäre auch der terroristische Nimbus des zweiten Hauptsatzes zerstört, welcher ihn als vernichtendes Prinzip des gesamten Lebens des Universums erscheinen lässt und zugleich würde die tröstliche Perspektive eröffnet, dass das Menschengeschlecht betreffs der Umsetzung von Wärme in Arbeit nicht einzig auf die Intervention der Steinkohle oder der Sonne angewiesen ist, sondern für alle Zeiten einen unerschöpflichen Vorrat verwandelbarer Wärme zur Verfügung steht,"[2]. Boltzmanns Erwiderung auf Loschmidts Einwand stellte noch einmal die Gedankengänge seines Freundes dar, um ihn dann des Irrtums zu überführen. Es wies darauf hin, dass Konfigurationen, wie die von Loschmidt angenommen, in der Natur real fast nie vorkommen und sehr instabil gegenüber kleinsten Fluktuationen sein müssen, welche ihrerseits nur in Richtung einer Vergrösserung der Entropie gehen können. Loschmidt verfolgte seinerseits seine Idee weiter und zeigte, dass bei endlichen abgeschlossenen Systemen genau so

viele Anfangsbedingungen existieren, die zumindest für kurze Zeit zu einer Abnahme der Entropie führen, wie solche die gemäss dem zweiten Hauptsatz zu einer Zunahme der Entropie führen. Bei grossen Systemen ist dem nicht mehr so. Je grösser das System ist, umso geringer wird die Wahrscheinlichkeit, dass es stark vom thermodynamischen Gleichgewicht abweicht. Bei grossen Systemen entspricht der weitaus grösste Teil aller Zustände, die einem abgeschlossenen thermodynamische System mit fester Energie überhaupt zur Verfügung stehen, Gleichgewichtszuständen und Quasigleichgewichtszuständen d.h. Zustände die nur minimal vom Gleichgewicht mit maximaler Entropie abweichen. Nach Boltzmann ist also ein grosses System nicht immer in thermodynamischem Gleichgewicht grösster Entropie, sondern schwankt minimal um diesen Wert, was einer unvorstellbar grossen Anzahl von Zuständen entspricht.

Auf Loschmidts Umkehrinwand hin, stellte Boltzmann fortan Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen in den Vordergrund seiner Überlegungen; Er schreibt 1877: "Eine Beziehung des zweiten Hauptsatzes zur Wahrscheinlichkeitsrechnung zeigte sich zuerst, als ich nachwies, dass ein analytischer Beweis desselben auf keiner anderen Grundlage möglich ist, als auf einer solchen welche der Wahrscheinlichkeitsrechnung entnommen ist,"[13]. Und weiter: " Diese Beziehung erhält eine weitere Bestätigung durch den Nachweis, dass ein exakter Beweis der Sätze über Wärme Gleichgewicht am leichtesten dadurch gelingt, dass man nachweist, dass eine gewisse Grösse, welche ich wiederum mit E bezeichnen will, infolge des Austausches der lebendigen Kraft unter den Gasmolekülen nur abnehmen kann, und daher für den Zustand des Wärme Gleichgewichtes ihren Minimalwert hat,"[13].

Für Boltzmann zählten, von nun an, nur mehr die Methoden der statistischen Mechanik in der Thermodynamik. So schreibt er 1877: "Man könnte sogar aus dem Verhältnisse der Zahl der verschiedenen Zustandsverteilungen deren Wahrscheinlichkeit berechnen, was vielleicht zu einer interessanten Methode der Rechnung des Wärme Gleichgewichtes führen würde,"[13]. Die Boltzmannschen Überlegungen führten gleichzeitig zu einem Weg in die Quantenmechanik. Diesen öffnete er, indem er die Energievariable als ganzzahliges Vielfaches des "Energiequants," ansetzt. Damit hat Boltzmann bereits 1872 die 1900 von Max Planck postulierte Quantisierung der Energie vorweg genommen. Noch ausgeprägter verwendete Boltzmann 1877 die "Quantisierung," der Energie bei seiner Ableitung eines Zusammenhanges zwischen Entropie S und thermodynamischer Wahrscheinlichkeit. Letztere ist dem vom betrachteten Makrozustand belegten Phasenraumvolumen proportional. Klassisch entspricht jedem Punkt im Phasenraum ein Mikrozustand, aber dieses Kontinuum ist nicht abzählbar. Um den Phasenraum abzählbar zu machen, teilte Boltzmann diesen in Zellen gleicher endlicher Grösse ein, wobei jetzt jede einzelne Zelle einem Mikrozustand entspricht in dem jedem einzelnen Molekül ein ganz bestimmter diskreter Energiewert zugewiesen ist. Die Gesamtzahl der Mikrozustände ergibt sich dann durch alle möglichen Permutationen der einzelnen Moleküle, die so genannte Permutabilität P:

$$(4.6) \quad P = \frac{N!}{w_0! w_1! \dots w_p!}$$

Dieser Ausdruck soll ein Maximum werden unter den Nebenbedingungen konstanter Zahl der Moleküle:

$$(4.7) \quad w_0 + w_1 \dots w_p = N$$

und konstanter Gesamtenergie λ :

(4.8)

$$0w_0 + \varepsilon w_1 + 2\varepsilon w_2 + \dots + p\varepsilon w_p = \lambda$$

In diesen Formeln bedeuten die w_i die Zahl der Moleküle in den einzelnen Zuständen, was natürlich zu einer speziellen Energieverteilung im Phasenraum führt.

Da der Logarithmus eine monotone Funktion ist, genügt es, das Maximum von $\ln P$ zur ermitteln. Die Stirlingsche Formel für $w_s!$ ergibt dann:

(4.9)

$$\ln(w_s!) \cong w_s (\ln(w_s - 1))$$

die selbe Struktur also wie die Formel für das H - Funktional. Boltzmann multipliziert nun die Nebenbedingungen mit Lagrangemultiplikatoren und addiert sie zum Logarithmus der Permutabilität unter gleichzeitiger Variation der w_s und Gleichsetzung derselben zu Null. Damit ergibt sich schliesslich für die Maxwellsche Energieverteilung:

(4.10)

$$w_s = \frac{N\varepsilon}{\mu} e^{-\frac{\varepsilon}{\mu}}$$

mit $\mu = \frac{\lambda}{N}$ die mittlere Energie der Moleküle. Über die Beziehung $w_s = \varepsilon \cdot f(s \in)$ kann die Permutabilität unmittelbar mit dem Funktional in Beziehung gebracht werden. Schliesslich stellt Boltzmann folgenden Zusammenhang mit der Entropie her

(4.11)

$$\ln P = - \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f \log f d\xi d\eta d\zeta = -S$$

Boltzmann schreibt dazu: "Es ist daher das Permutabilitätsmass eine Grösse, welche für den Zustand des Wärme-gleichgewichtes bis auf einen konstanten Faktor und Addenden mit der Entropie identisch ist, welche aber auch während des Verlaufes eines nicht umkehrbaren Körpers einen Sinn behält und auch während eines solchen fortwährend zunimmt,"[10].

1900 hat Max Planck den numerischen Wert der Proportionalitätskonstante, die heute Boltzmannkonstante genannt wird bestimmt und mit der Bezeichnung für die Permutabilität Gleichung (4.11) in die Gestalt:

(4.12)

$$S = k \log W$$

gebracht, wobei die berechnete Wahrscheinlichkeit des Zustandes ist. Einstein hat diese Gleichung 1905 als Boltzmannsches Prinzip bezeichnet. Sie ist bis heute einer der Grundpfeiler der statistischen Mechanik.

V

Der Kreis um die beiden Protagonisten der Thermodynamik sollte sich jetzt schliessen und es gilt die Differenzen zwischen Boltzmann und Planck herauszuarbeiten und gleichzeitig die Konvergenz ihrer komplett verschiedenen Gedankengänge darzustellen. Planck war es schnell bewusst, dass ein simpler Einstieg in die Gedankengänge der statistischen Mechanik, ihm nicht grundlegende neue Erkenntnisse beschern würde und er damit Gefahr lief immer im Kielwasser von Boltzmann segeln zu müssen. Dagegen

sties er auf dem Gebiet der strahlenden Wärme auf Neu-land, insbesondere bei der Strahlung der schwarzen Körper. In diesem, weiter oben beschriebenen Gebilde, entspricht eine ganz bestimmte Verteilung der Strahlungsenergie auf die einzelnen Schwingungszahlen des Spektrums. Die so genannte normale Energieverteilung wird also durch eine universelle, von keinerlei Material abhängige Funktion dargestellt und Planck meinte es sei eine besonders lockende Aufgabe nach diese Funktion zu suchen. Seine Recherche ging zuerst in Richtung der Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie deren Gültigkeit durch die Hertzsche Entdeckung voll bestätigt wurde. Planck schreibt: "Ich dachte mir also den evakuierten Hohlraum erfüllt mit elektrisch schwingender Energie ausstrahlenden und absorbierenden Körpern und wählte, da es auf ihre Beschaffenheit nicht ankommt, solche von möglichst einfacher Natur aus, nämlich lineare Resonatoren oder Oszillatoren von bestimmter Eigenfrequenz und schwacher, nur durch Strahlung bewirkter Dämpfung. Meine Hoffnung ging dahin, dass für einen beliebig angenommenen Anfangszustand dieses Gebildes die Anwendung der maxwellschen Theorie auf irreversible Strahlungsvorgänge führen würde, die in einen stationären Zustand, den des thermodynamischen Gleichgewichtes, ausmünden müssen, in welchen die Hohlraumstrahlung die gesuchte normale, der Strahlung des schwarzen Körpers entsprechende Energieverteilung besitzt,"[14].

Plancks Untersuchungen gingen zuerst dahin eine Irreversibilität festzustellen, bei einem durch eine elektrodynamische Welle erregten, Energie absorbierenden und emittierenden Oszillator. Diese Meinung jedoch war irrig, worauf L. Boltzmann als einer der Ersten hingewiesen hat und zeigte dass dieser Vorgang auch zeitverkehrt ablaufen könnte. Die Umkehr setzt nur in irgend einem Zeitpunkt voraus, das Vorzeichen aller mathematischen Feldstärken, unter Beibehaltung der elektrischen Feldstärken umzukehren. Es kam also von Irreversibilität nicht die Rede sein.

Um daher in der Theorie der Wärmestrahlung überhaupt weiterzukommen, muss eine einschränkende Bedingung eingeführt werden, welche derartige singuläre, in der Natur wohl niemals stattfindende Vorgänge ausschliesst. Zu diesem Zwecke führte Planck die Hypothese der "natürlichen" Strahlung ein, deren Inhalt darauf hinausläuft, dass die einzelnen harmonischen Partialschwingungen aus dem sich eine Wärmestrahlungswelle zusammensetzt vollständig inkohärent sind. Auf dieser Grundlage entwickelte Planck dann die Gesetze der Strahlungsvorgänge in einem von linearen Oszillatoren mit bestimmten Eigenfrequenzen und schwacher Dämpfung erfüllten evakuierten Hohlraum zuerst für eine Hohlkugel, in deren Zentrum sich ein solcher Oszillator befindet, weil sich dann die Differentialgleichungen des Vorganges leicht integrieren lassen, dann zusammenfassend für den allgemeinen Fall eines beliebigen Hohlraumes mit beliebig vielen Oszillatoren. Als Resultat dieser Untersuchungen ergab sich der Satz, dass die Wechselwirkungen eines Oszillators und der ihn erregenden Strahlung in der Tat stets einen irreversiblen Vorgang bilden. Dieser besteht darin, alle anfangs vorhandenen räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Strahlungsintensität mit der Zeit auszugleichen, respektive zu mitteln. Damit fand Planck seinen eigenen Weg zur statistischen Mechanik und zum Denken Boltzmanns. Er ermittelte den Ausdruck für die Energie eines Oszillators von der Eigenfrequenz und beliebig kleinen Dämpfungsdekrement zu:

(5.1)

$$V = \frac{c^2}{\nu^2} \kappa_\nu$$

mit der Lichtgeschwindigkeit c und mit $\kappa_v d\nu d\Omega dt$: als der Energiemenge, welche ein linear polarisierter Strahl innerhalb der Spektralbreite durch irgendein im durchstrahlten Hohlraum gelegenes Flächenelement senkrecht dazu innerhalb des Öffnungswinkels $d\Omega$ in Zeit dt hindurch sendet. Das Wesentliche an der Gleichung (5.1) besteht darin, dass die Energie des Oszillators nur von der Strahlungsintensität κ_v und der Schwingungsintensität ν , nicht aber von seiner sonstigen Beschaffenheit abhängt. Aus der Irreversibilität des Vorgangs lässt sich nun eine Zustandsfunktion angeben deren Wert mit der Zeit wächst und welche daher als Entropie gedeutet werden kann. Planck macht folgenden Ansatz für diese Funktion:

$$(5.2) \quad \zeta = -\frac{U}{av} \log \frac{U}{ebv}$$

wo a und b universelle Konstanten sind und die Basis des natürlichen Logarithmus bedeutet. Er konnte mit seiner Festsetzung den Nachweis führen, dass die Entropie des Gesamtgebildes bei jedem beliebig gewählten Anfangszustand sowohl der Oszillatoren als auch der Hohlraumstrahlung mit der Zeit zunimmt. Dabei hängt der stationäre Endzustand des thermodynamischen Gleichgewichtes mit einem Maximum der Entropie nur von dem Parameter ab . Dieser gehorcht der Beziehung:

$$(5.3) \quad \frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}$$

Wobei T die absolute Temperatur bedeutet. Die Substitution von (5.2) in (5.3) unter Berücksichtigung von (5.1) ergibt den Wert der Strahlungsintensität für die Schwingungszahl ν :

$$(5.4) \quad \kappa_v = \frac{bv^3}{c^2} \cdot e^{-\frac{av}{T}}$$

Diese Relation entspricht dem Wienschen Strahlungsgesetz aus dem Jahre 1896 und seine Ableitung war Planck mit rein thermodynamischen Überlegungen gelungen. Dieses Gesetz war damit nicht nur empirisch bestätigt, sondern durch Planck auch theoretisch wohl begründet und alles schien sich in bester Ordnung zu befinden.

Aber schon bald darauf machten Lummer und Pringsheim sowie Paschen auf gewisse Unstimmigkeiten aufmerksam, welche sie bei der Einbeziehung grösserer Wellenlängen in ihren Messungen gefunden hatten. Durch eine gleichzeitige Steigerung der Messgenauigkeiten konnten Zweifel an der Richtigkeit der Formel (5.4) nicht mehr beseitigt werden und Planck prüfte ob der Ausdruck (5.2) für die Entropie nicht durch einen andern ersetzt werden müsste. Aber durch welchen? Plancks Berechnungen führten zuerst zu einem toten Punkt, bis er auf Grund der Messresultate, welche von Kurlbaum und Rubens für sehr grosse Wellenlängen erhalten wurden; Er setzte die Energie des Oszillators proportional zur absoluten Temperatur:

$$(5.5) \quad V = cT$$

und erhielt nach (5.3) durch Integration:

$$(5.6) \quad S = c \log U$$

und folglich:

$$(5.7) \quad \frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{c}{U^2}$$

Diese Beziehung tritt also für grosse Werte von U an die Stelle der für kleine Werte von U gültigen Relation:

$$(5.8) \quad \frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{avU}$$

Die allgemeine Beziehung, welche (5.7) und (5.8) als Grenzfälle enthält, lautet:

$$(5.9) \quad \frac{d^2 S}{dU^2} = -\frac{1}{avU + \frac{U^2}{c}}$$

welche durch Integration die Form annimmt:

$$(5.10) \quad \frac{dS}{dU} = \frac{1}{T} = \frac{1}{av} \log \left(1 + \frac{a'\nu}{U} \right)$$

mit der Abkürzung $ac = a'$. Die Formel (5.10) wurde wiederholt als richtig erkannt und für Planck war damit die Frage nach dem Gesetz der spektralen Energieverteilung in der Strahlung des schwarzen Körpers endgültig gelöst. Aber eine Begründung dieses Gesetzes war damit noch nicht gegeben. Dieses war eine schwierige Aufgabe, denn es handelte sich darum, eine theoretische Abteilung des Ausdrucks der Entropie eines Oszillators wie er sich aus (5.10) durch Integration ergibt, zu finden. Planck gab schliesslich folgende Form an:

$$(5.11) \quad S = \frac{a'}{a} \left[\left(\frac{U}{a'\nu} + 1 \right) \log \left(\frac{U}{a'\nu} + 1 \right) - \frac{U}{a'\nu} \log \frac{U}{a'\nu} \right]$$

Gleichzeitig wurde er sich bewusst, dass ganz neue Betrachtungen über das Wesen der Entropie notwendig wurden, die über die ursprüngliche Ausgangsposition der Elektrodynamik hinausführen müssen. Mit diesen Überlegungen schwenkte Planck auf die Arbeiten von Ludwig Boltzmann ein, der den Sinn des Entropiebegriffes am tiefsten erfasst hatte. Wie wir gesehen haben, deutete dieser die Entropie eines bestimmten Zustandes des betrachteten physikalischen Gebildes, als ein Mass für die Wahrscheinlichkeiten dieses Zustandes und erblickte den Inhalt des zweiten Hauptsatzes in dem Umstand, dass das Gebilde bei jeder in der Natur eintretenden Veränderung in einen wahrscheinlicheren Zustand übergeht. Planck gesteht: "Ich selber hatte mich bis dahin um den Zusammenhang zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit nicht gekümmert. Es hatte für mich deshalb nichts Verlockendes, weil jedes Wahrscheinlichkeitsgesetz auch Ausnahmen zulässt, und weil ich damals dem zweiten Wärmesatz ausnahmslose Gültigkeit zuschrieb,"[14].

Da Planck aus dieser Situation keinen anderen Ausweg erblicken konnte, setzte er auf die Boltzmannsche Methode. Er definierte den thermodynamischen Zustand eines beliebigen physikalischen Gebildes zu:

(5.12)

$$S = k \log W$$

Wo, W die gehörig berechnete Wahrscheinlichkeit des Zustandes bezeichnet. Die Konstante ist universell und ausschliesslich eine von den Masseinheiten abhängige Zahl und wie wir schon gesehen haben, wird sie die Boltzmannsche Konstante genannt. Planck wendete dann die Gleichung (5.12) auf das Strahlungsgesetz des schwarzen Körpers an und bediente sich auch der Boltzmannschen Gedankengänge. Sie beruhen auf einem Abzählverfahren aus dessen atomistischer Gastheorie. Um jedoch etwas abzählen zu können muss Planck die Energie der Schwarzkörperstrahlung in Energieelemente unterteilen. Boltzmann lässt die Grösse solcher Energiepakete am Ende seiner Berechnungen gegen Null gehen und erhält so wieder eine kontinuierliche Energieverteilung. Solches gelingt Planck jedoch nicht. Seine Energieelemente müssen eine feste Grösse haben: das Produkt aus der betrachteten Frequenz und einer Konstanten h die später als das Plancksche Wirkungsquantum bezeichnet wird.

In einer Sitzung der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin vom 14. Dezember 1900 stellt Planck erstmals eine Herleitung seines Strahlungsgesetzes vor. Sein aus diesen Überlegungen hervorgegangener Artikel in den „Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft, mit dem Titel: „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum“ [14] wird gemein hin als Geburtsurkunde der Quanten Theorie gewertet. Er schrieb, dass es ihm daran gelegen sei: „den eigentlichen Kernpunkt der ganzen Theorie möglichst übersichtlich darzulegen und dies kann wohl am besten dadurch geschehen, dass ich Ihnen hier ein neues ganz elementares Verfahren beschreibe, durch welches man, ohne von einer Spektralformel oder auch von irgendeiner Theorie etwas zu wissen, mit Hilfe einer einzigen Naturkonstanten die Verteilung einer gegebenen Energiemenge auf die einzelnen Farben des Normalspektrums und dann mittels einer zweiten Naturkonstanten auch die Temperatur dieser Energiestrahlung zahlenmässig berechnen kann“ [14]. Er fährt fort: „In einem von spiegelnden Wänden umschlossenen diathermanen Medium mit der Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit, befinden sich in gehörigen Abständen voneinander eine grosse Anzahl von linearen monochromatisch schwingenden Resonatoren und zwar mit der Schwingungszahl ν' (pro Sekunde), N' mit der Schwingungszahl ν'' , N'' mit der Schwingungszahl etc, wobei alle N grosse Zahlen sind. Das System enthalte eine gegebene Menge Energie; die Totalenergie E_f in erg, die teils in dem Medium als fortschreitende Strahlung, teils in den Resonatoren als Schwingungen derselben auftritt. Die Frage ist, wie sich im stationären Zustand diese Energie auf die Schwingungen der Resonatoren und auf die einzelnen Farben der in dem Medium befindlicher Strahlung verteilt und welche Temperatur dann das ganze System besitzt,“ [14].

Planck versucht nun die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, dass das konstruierte Gebilde aus Resonatoren die vorgegebene Energie besitzt. Er sieht diese als eine Summe von diskreten, einander gleichen Elementen an, deren Anzahl durch die sehr grosse Anzahl bezeichnet werden möge:

(5.13)

$$U_N = N \cdot U = P \cdot \varepsilon$$

wobei U die mittlere Energie eines Oszillators bedeutet.

Dann lässt sich als ein Mass der gesuchten Wahrscheinlichkeit nach (5.12) ohne weiteres bestimmen als die Zahl der verschiedenen Arten wie die Energieelemente auf die Oszillatoren verteilt werden können.

Also:

(5.14)

$$W = \frac{(P+N)!}{P!N!}$$

Daraus folgt die Entropie des Oszillatoren Systems nach (5.12)

(5.15)

$$S_N = N \cdot S = k \log \left(\frac{(P+N)!}{P!N!} \right)$$

oder nach dem umgeformten Stirlingschen Satz:

(5.16)

$$S = k \left\{ \left(\frac{P}{N} + 1 \right) \log \left(\frac{P}{N} + 1 \right) - \frac{P}{N} \log \frac{P}{N} \right\}$$

Planck kehrt dann zu der Zahl der möglichen Komplexionen zurück: „Unter allen Energieverteilungen welche bei konstant gehaltenen $E_0 = E + E' + E'' + E''' \dots$ möglich sind, gibt es eine einzige ganz bestimmte, für welche die Zahl der möglichen Komplexionen R_0 grösser ist als für jede andere; diese Energieverteilung suchen wir auf, eventuell durch Probieren; denn sie ist gerade diejenige, welche die Resonatoren im stationären Strahlungsfeld annehmen, wenn sie insgesamt die Energie E_0 besitzen“ [14]. Es lässt sich dann durch eine elementare Rechnung die räumliche Dichtigkeit der im Spektralbereich ν bis $\nu + d\nu$ angehörenden strahlenden Energie im diathermalen Medium bestimmen zu:

(5.17)

$$\mu_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U_\nu d\nu$$

Mit c als der Boltzmannschen Konstante welche mit der Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit übereinstimmt

Aus (5.17) entsteht schliesslich:

(5.18)

$$\mu_\nu d\nu = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{d\nu}{e^{k\theta} - 1}$$

(5.18) entspricht genau der von Planck früher angegebenen Spektralformel:

(5.19)

$$E_\lambda d\lambda = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda\theta} - 1}$$

Plancks Ableitungen in seiner Arbeit von 1900 sind alles andere als detailliert und er sah sich gezwungen in Jahre 1901 eine Reihe von anderen Aufsätzen über seine Theorie der Strahlung des schwarzen Körpers zu veröffentlichen. Fordergründig war Planck's Strahlungsformel ein Erfolg die allen experimentellen Prüfungen standhielt. Jedoch der physika-

liche Sinn der Energieelemente in Planck's Herleitung blieb obskur. Eine klare Beantwortung nach diesem Sinn nahm noch Jahre in Anspruch und beschäftigte allen voran Albert Einstein. Bei diesen Überlegungen machte sich immer mehr die Überzeugung breit, dass ein völliger Umsturz der klassischen Physik notwendig sei. Planck selbst blieb jedoch den neu eingebrachten Ideen gegenüber skeptisch. Er konnte die grosse Tragweite seiner Quantenhypothese nicht erahnen als er, wie wir sahen, 1900 die Ableitung des Strahlungsgesetzes für den schwarzen Körper vorstellte. Bald zeigte sich, dass sie für weitere physikalische Phänomene Bedeutung hatte; Planck und seine Zeitgenossen versuchten zunächst, durch Abwandlung der klassischen Mechanik eine widerspruchsfreie Quantentheorie zu formulieren. Jedoch erst der Bruch mit dieser klassischen Mechanik im Jahre 1925 führte zur Quantenmechanik in ihrer heutigen Form.

Prosper Schroeder
Ingénieur diplômé

LITERATUR

- [1] M. Planck: Eight Lectures on theoretical Physics, Dover Publications 1998
- [2] L. Boltzmann: Entropie und Wahrscheinlichkeit Einführung, H. Deutsch 2000
- [3] M. Planck: Zur Geschichte der Auffindung des Physikalischen Wirkungsquantums in M. Planck Vorträge, Reden, Erinnerungen, Springer 2001
- [4] L. Boltzmann: Über statistische Mechanik in L. Boltzmann: Populäre Schriften, A. Barth 1919
- [5] H. Poincaré: Dernières Pensées, Flammarion 1912
- [6] S. Carnot: La puissance motrice du feu, Paris 1831
- [7] R. Clausius: Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie, Vieweg 1864-67
- [8] M. Planck: Wissenschaftliche Selbstbiographie in M. Planck Vorträge, Reden, Erinnerungen, Springer 2001
- [9] E. Scheibe: Die Philosophie der Physiker, Beck 2007
- [10] Th. S. Kuhn: Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity 1894-1912, University of Chicago Press, 1987
- [11] L. Boltzmann: Weitere Studien über das Wärme Gleichgewicht unter Gasmolekülen, Wiener Berichte II.1872
- [12] L. Boltzmann: Vorlesungen über Gastheorie, Leipzig Barth 1896
- [13] L. Boltzmann: Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärme Gleichgewicht, Wiener Berichte 1877
- [14] M. Planck: Über das Gesetz der Energieverteilung in Normalspektrum, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen, Gesellschaft 1900

Fires are a main cause of death casualties in accidents and cause major damage. It is believed that every year alone 1% of all inhabitants of the European Union are affected by burns. Prevention is the only answer and costs always less than to end fires. But there is no single policy for fire prevention and fire protection in the European Union. One volcano sparks the discussion on a better flight control coordination in the EU, but the everyday news about fires is not able to reach a unified approach in preventing fires. Currently fire detectors, fire extinguishers and sprinkler systems remain the most effective means of fire prevention and protection. But most Europeans still do not use the available means or ignore their need and importance in fire prevention. The lack of European legal harmonization and a common regulatory framework causes avoidable casualties and damages from fires. This article sets out what Europe already has done in fire prevention, what it could do and highlights Luxembourg's case.

FIRE PREVENTION IN EUROPE_

_Table 1
Trends in fires in European Union countries in 2002-2006 4
(No information found on the Netherlands, Belgium, Cyprus, Malta and Luxembourg)

N°	Country	Population, thous. inh.	Number of fires					Average per	
			2002	2003	2004	2005	2006	year	1000 inh. a year
1	Germany	82401	183913	213035	179272	158600	187604	184485	2,24
2	France	63714	323241	394707	334421	376600	359300	357654	5,61
3	UK	60776	519373	621000	443000	430291	436047	489942	8,06
4	Italy	58148	180327	218486	212837	218858	227014	211504	3,64
5	Poland	38518	151026	222199	161720	184316	-	179815	4,67
6	Romania	21537	12745	-	-	10199	12926	11957	0,56
7	Greece	10706	-	24463	30318	-	-	27391	2,56
8	Portugal	10643	-	-	-	64560	-	64560	6,07
9	Czech Rep.	10229	18295	28156	20550	19181	10665	19369	1,89
10	Hungary	9956	31541	-	21471	24748	21829	24897	2,5
11	Sweden	9031	26998	29088	24620	26050	27106	26772	2,96
12	Austria	8200	32590	34531	-	31397	30297	32204	3,93
13	Bulgaria	7323	18450	-	23830	18969	29090	22585	3,08
14	Denmark	5468	16362	-	-	16551	16965	16626	3,04
15	Slovakia	5448	12181	15189	10118	-	10442	11978	2,2
16	Finland	5239	-	-	11713	-	17800	14757	2,82
17	Ireland	4109	-	31837	30778	30537	-	31051	7,56
18	Lithuania	3575	21237	18295	16279	15075	24030	18983	5,31
19	Latvia	2260	12744	11030	9901	8853	17720	12050	5,33
20	Slovenia	2009	-	-	6361	6780	-	6571	3,27
21	Estonia	1316	17311	12719	12002	10614	14900	13509	10,27

_Table 2
Trends in fire deaths in the European Union countries in 2002-2006 4
(No information found on Belgium)

N°	Country	Population, thous. inh.	Number of fire deaths					Average number of fire deaths		
			2002	2003	2004	2005	2006	per year	per 100 thousand inhabitants	per 100 fires
1	Germany	82401	550	475	446	498	424	479	0,58	0,26
2	France	63714	486	514	467	469	341	455	0,71	0,13
3	UK	60776	562	592	508	492	504	532	0,87	0,11
4	Italy	58148	120	112	135	81	112	112	0,19	0,05
5	Spain	40448	230	224	218	223	-	224	0,55	-
6	Poland	38518	484	525	486	515	-	503	1,3	0,28
7	Romania	21537	222	-	-	209	220	217	1,01	1,88
8	Netherlands	16571	58	53	42	-	80	58	0,35	0,05
9	Greece	10706	103	40	37	100	72	70	0,66	0,26
10	Portugal	10643	77	108	-	-	-	93	0,87	0,14
11	Czech Rep.	10229	109	100	130	69	-	102	1	0,53
12	Hungary	9956	136	192	157	131	154	154	1,55	0,62
13	Sweden	9031	137	135	65	104	83	105	1,16	0,39
14	Austria	8200	39	45	46	45	33	42	0,51	0,13
15	Bulgaria	7323	97	116	105	102	96	103	1,41	0,46
16	Denmark	5468	79	90	85	87	69	82	1,5	0,49
17	Slovakia	5448	62	54	45	51	49	52	0,96	0,43
18	Finland	5239	95	105	103	-	119	106	2,01	0,72
19	Ireland	4109	47	34	35	41	-	39	0,96	0,13
20	Lithuania	3575	236	255	233	295	307	265	7,42	1,4
21	Latvia	2260	268	261	195	236	235	239	10,58	1,98
22	Slovenia	2009	20	25	17	12	7	16	0,81	0,24
23	Estonia	1316	131	142	127	134	164	140	10,61	1,04
24	Cyprus	788	-	-	5	-	-	5	0,63	-
25	Luxembourg	480	2	2	1	2	-	2	0,36	-
26	Malta	402	2	3	1	2	-	2	0,5	-

Accidents are the most terrifying causes for death. Beside the shock effect accidents have on victims, the frightening part is that accidents are the main killers for people younger than 30 years old¹. Whoever wants to have a long life should first of all look into accident prevention.

Not only from a personal perspective avoiding accidents makes a lot of sense, but also for the society as a whole increased security is a stabilizing factor. The recently adopted Internal Security Strategy for the European Union aims protecting people and the values of freedom and democracy, so that everyone can enjoy their daily lives without fear. The consequence of this strategy is a strong emphasis on prevention measures to prevent in particular human made disasters.

Besides car accidents, falls and drowning, fire accidents are still too common. Each year an estimated two and a half million fires kill about twenty five thousand people in Europe alone while injuring another five hundred thousand. Such high loss of life and injuries is a shame as one knows that it is rather easy to take measures, while 80% of fatalities occur in private homes.² And it is believed that the number of man made fires is much larger than the number of fires caused by technical malfunctions. In fact smoking and cooking take the leading place among causes of fires at homes. And most of the fatalities occur at night while people are at sleep.

It is too ridiculous for words that in general European politicians do not give higher priority to fire prevention. Important causes of death like diabetics and asthma suffer from the lack of attention in the headlines in newspapers, but fires are every day in the news headlines. And the measures to prevent fire are easy to take as well as for politicians as for all Europeans.

1. Fire incidents in Europe

Fire prevention is a typical area in which European countries have different and uncoordinated policies. Even official fire statistics at a European level do not exist. National statistics do exist, but are based on different assumptions from country to country.

What is known is that every year five million people or 1% of the all people in the European Union are affected by burns, of which seventy thousand get seriously injured and need hospitalisation. A hidden issue is that young people are the most affected by burns. American statistics shows that in 40% of cases fire victims are younger than 21 years old.

The number of fires and the number of victims vary widely in EU member states³. The largest average number of fires per 1000 inhabitants is observed in Estonia (10.27), followed by Britain (8.06), Ireland (7.56), Portugal (6.07) and France (5.61). Statistically the lowest number of fires is recorded in Romania (0.56), the Czech Republic (1.89), Slovakia (2.20), Germany (2.24) and Hungary (2.50). But probably this says more about the peculiarities and imperfections of national statistical data than about fires taking place.

Table 1

Fire is a major cause of deaths and injuries. Statistics indicates that on average each year in European countries more than 4200 people become the victims of fires. Average absolute number of victims was the largest in the UK, Poland, Germany and France. However, the number of victims per million inhabitants in these countries is not the largest. The highest risk to get killed by fire is in Estonia (10.61 victims per million inhabitants), Latvia (10.58) and Lithuania (7.42). Most of the victims per 100 fires take place in Latvia (1.98), Romania (1.88) and Lithuania (1.40). The most safe in this respect are Italy (0.05), Netherlands (0.05), Britain (0.11), France, Austria and Ireland (0.13).

Table 2

Mistakenly one could conclude that apparatuses around us impose different risks in various EU countries, but with a free internal market and common product standards that is highly unlikely. Why then there is such a significant difference in the number of fires and the number of victims in different EU countries? The main reason is legislative. Legislative features of European countries in the fire protection vary greatly from country to country. In some European Union countries fire legislation does not exist, or it is under conception. Also building standards and fire safety regulations vary, as do the national experience of implementing mandatory requirements for construction with fire prevention devices. Moreover technical standards for fire equipment and features of product certification differ in various EU countries. Even legislative requirements for mandatory installation of smoke detectors and sprinkler systems vary from country to country and attention of state authorities towards fire safety and protection are not the same throughout Europe.

The obvious solution would be a European public policy against fire which would harmonise European fire protection legislation. That would lead to a better awareness of European citizens in matters of fire safety and would improve the public fire prevention education.

2. What can be done to prevent fire?

Rather simple measures can reduce the risk of fire drastically. Probably the most effective is the use of fire detectors. The majority of fires occur during the night when people are at sleep. Potential victims need to be woken up, before they get caught in the smoke of direct fire. In combination with fire extinguishers, smoke alarms are even more effective. Disadvantage of fire extinguishers is that they need to be at the right place at the right time and people have to know how to operate them. Sprinkler installations are even more effective. Especially in Europe – where sprinkler installations are nearly absent in residential buildings – sprinkler

installations still provide a large potential in reducing fire casualties.

One of the promising means of reducing the number of fires is the use of noninflammable consumer goods, including selfextinguishing cigarettes, upholstered furniture and electrical appliances with inflammable plastic coverings.

2.1. Fire Detectors

Fire detectors are one of the most popular and most effective means in fighting fires in residential and commercial premises. Most of them are automatic smoke alarm detectors and they should be installed on each floor. Their use can not only prevent damage from fire, but also save lives and prevent inhabitants injuries. Most fires occur at night when people sleep. When the fire is still small and limited, the fire can be fought by simple means like putting a blanket over it. The earlier one is at the fire spot, the easier is to prevent a complete disaster to occur.

Three main types of smoke alarm are currently on the market. They are known as ionisation detectors, optical detectors which are also described as photo electronic detectors and a combination of both

- _ Ionisation detectors are the cheapest to produce and cost very little to purchase. They are very sensitive to small particles of smoke resulting from flaming fires, such as an overheated pan with potatoes. Before the smoke gets too thick an ionisation detector starts of the alarm. A disadvantage is that they are marginally less sensitive to slow burning and smouldering fires. Such fires give off larger quantities of smoke before flaming occurs. The main disadvantage of ionisation detectors is that they emit weak radiation and therefore they are prohibited in most European countries.
- _ Optical detectors are more expensive but more effective than ionisation detectors at detecting larger particles of smoke produced by slow-burning fires. Take very dangerous fires such as smouldering foam-filled upholstery and overheated PVC wiring. Optical detectors are marginally less sensitive to free burning flaming fires.
- _ Combined ionisation and optical detectors are as well effective at detecting slow-burning as well as flaming fires - which are cover all common types of fire.

Said this, the use of fire detectors currently used in European homes is still limited. Only a few EU countries have mandatory requirements for installation of fire detectors in homes, offices, government institutions, and all other buildings. In practise a lot of fire detectors enter the EU market without being refused, while inadequately addressing the norms and regulations already in place at EU level. As a result low quality fire detectors are entering the market having a negative effect on the image of detectors. Cheap detectors give false alarms, reducing the impact of the way people perceive them. These cheap detectors are stand-alone, but good detectors linked into a single system determine more accurately, quickly and effectively the source of fires. The majority of fatal victims are not in the same room as the point of origin.

2.2. Fire extinguishers

Fire extinguishers, along with other passive fire protection equipment, such as fireproof doors, fire blankets etc. are very effective and can significantly reduce the number of fires and damage caused by them. Between 2005 and 2006 a survey⁴ carried out on a total number of 1244 stove top fires, 46% were extinguished by the occupant. This implies that at least 12 % of all the domestic fires has been extin-

guished by the occupant, while the contribution of stove top fires to domestic fires was 27%.

2.3. Sprinkler systems

Sprinkler systems are very effective in fighting fire and even in fire prevention. And they are a promising option while they are mostly unused in residential areas in European countries. Unfortunately there is very limited research on their impact on fire safety. However a study performed in a small city of 130,000 inhabitants (Scottsdale in Arizona, USA) showed significant impact. Since 1985 an obligation to include sprinklers in newly built houses has been fixed in (municipal) legislation. After ten years the number of non-fatal casualties in fires decreased with 80% and the 40 fires in houses applied with a sprinkler caused no fatalities.⁵ There is however an issue with the costs of sprinkler installations. In 1993 it was concluded that based on a cost benefit analysis, "notwithstanding the substantial reduction in life risk, sprinklers in dwellings may, at current prices (in 1993), be uneconomic compared with the cost of safety measures in other fields. (...) Nearly half of fatal fire casualties in dwellings occur in fires started in living or dining rooms. Hence, it may be more cost effective (...) to install sprinklers only in those rooms."⁶

3. What are legislators doing about it?

3.1. European legislation

Fire prevention and protection devices are regulated already to a certain extent by European standards and qualifications. The European fire protection legislation consists of directives, construction and technical standards, compliance with which is compulsory for construction companies, manufacturers and suppliers of fire equipment. Fire detectors are subject to several directives:

1. The Electromagnetic Compatibility Directive (EMC) first limits electromagnetic emissions of equipment in order to ensure that, when used as intended, such equipment does not disturb radio and telecommunication as well as other equipment. The Directive also governs the immunity of such equipment to interference and seeks to ensure that this equipment is not disturbed by radio emissions when used as intended.

The EMC Directive operates on two levels, depending on the industry:

- _ Industrial level. On this level electric noise is allowed as powerful electrical machines create significant electrical noise and interference.
- _ Light (Commercial) industry level.

Most of the fire safety equipment does not create a high level of noise, but for use in all applications it should carry a high level of electrical noise. The EN50130-4 standard has been published to cover alarm equipment susceptibility. The general light industrial standard is used for emissions.

2. The Low Voltage Directive (LVD) ensures that electrical equipment within certain voltage limits both provides a high level of protection for European citizens and enjoys a Single Market in the European Union. For electrical equipment within its scope, the Directive covers all health and safety risks, thus ensuring that electrical equipment is safe in its intended use. The Directive covers electrical equipment with a voltage between 50 and 1000 V for alternating current and between 75 and 1500 V for direct current. The majority of fire protection equipment works on ultra-low voltage (24V), so this directive does not apply for them. The LVD directive applies to fire alarm panels,

mains rated relays or interfaces and other equipment connected to the mains supply such as door closers, smoke vents etc.

3. The Construction Products Directive (CPD), 89/106/EEC, applies to any product which is produced for incorporation in a permanent manner in construction works, including buildings and civil engineering. Part of this directive relates to safety in case of fire and requires all fire alarms and smoke detectors have to be certified by a third party in accordance with the harmonized European standard. Often this will be the part of EN 54 standard (eg, EN 54-2 for control and indicating equipment, EN 54-3 for fire alarm sounders, EN 54-7 for smoke detectors, EN 54-11 for manual call points, etc.). Most parts of this standard have been agreed or are under harmonization. After harmonization of standards their implementation will be required. So after few next years the presence of a third party will be required.

4. CE marking is a mark to indicate that the product on which it is affixed is in conformance with EU Product Safety Directives. Today CE marking means that the product meets the EMC and LV directives. As part of CPD Directive CE marking equipment will ensure compliance to national or European harmonized standards. CE marking is not retrospective and that is why it will be clear as to what directive the marking relates to.

5. Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances (RoHS) in Electrical and Electronic Equipment aims to minimize the environmental impact of waste electrical and electronic equipment by reducing the quantities of four heavy metals and two flame retardants. This directive is not currently apply to fire alarm and smoke detectors. However, it is likely that in the near future the scope of this directive will be expanded to include more dangerous substances and materials used in electrical and electronic equipment that can harm health.

The two broad technical standards EN 14604 and EN 54 apply to fire detectors in the European Union.

1. The European standard EN 14606 is imposed for all detectors since 1 August 2008. This European standard was developed under a mandate from the European Commission to support the essential requirements of European Directive 89/106/EEC on construction products. It specifies requirements, test methods, performance criteria and instructions of manufacturers of the smoke alarm using the principle of dissemination or transmission of light, or ionization, intended for household or similar residential application. It does not apply to alarm devices for incorporation in systems using control equipment and otherwise separated, these components are covered by the series of standards EN 54.

2. Suite of standards EN 54. Fire detection and alarm systems.

Standards EN 14604 and EN 54 cover all technical requirements for fire detectors and their components and their compliance is mandatory in all EU countries from the 1st of August 2008. Besides that, most European countries issue their own national technical standards, strengthening and also making changes to European standards. To enforce such, most countries involve their own national institutes of standardization and their certification bodies designated to bring standards in line with the characteristics of each country and carry out certification of producers in accordance with national specifications.

N°	Standard	Name	Description
1	EN 54-1	Introduction	The Standard EN54-1 is the first of the EN54 series of fire alarm and fire alarm systems. This standard sets the scope, definitions and general construction of such a system.
2	EN 54-2	Control and indicating equipment	Specifies requirements, methods of test and performance criteria for control and indicating equipment for use in fire detection and fire alarm systems installed in buildings.
3	EN 54-3	Fire alarm sounders	Specifies the requirements, test methods and performance criteria for in a fixed installation intended to signal and audible warning of fire between a fire detection and fire alarm system and the occupants of a building. It is intended to cover only those devices which derive their operating power by means of a physical electrical connection to an external source as a fire alarm system. This standard specifies fire alarm sounders for two types of application environment, type A for indoor use and type B for outdoor use.
4	EN 54-4	Power supply equipment	Specifies requirements, methods of test and performance criteria for power supply equipment of fire detection and fire alarm systems installed in buildings.
5	EN 54-5	Heat detectors - Point detectors	Specifies the requirements, test methods and performance criteria for point detectors for use in fire detection and fire alarm systems for buildings. For other types of heat detector, or for detectors intended for use in other environments, this standard should only be used for guidance. Heat detectors with special characteristics and developed for specific risks are not covered by this standard
6	EN 54-7	Smoke detectors - Point detectors using scattered light, transmitted light or ionization	Specifies requirements, test methods and performance criteria for point smoke detectors that operate using scattered light, transmitted light or ionization, for use in fire detection systems for buildings. For other types of smoke detector, or smoke detectors working on different principles, this standard should only be used for guidance. Smoke detectors with special characteristics and developed for specific risks are not covered by this standard.
7	EN 54-10	Flame detectors - Point detectors	Specifies requirements, test methods and performance criteria for point-type, resettable flame detectors that operate using radiation from a flame for use in fire detection systems installed in buildings.
8	EN 54-11	Manual call points	Specifies the requirements and methods of test for manual call points in fire detection and fire alarm systems. It takes into account the appearance and operation of the call points for type A "direct operation" and type B "indirect operation" and covers those which are simple mechanical switches, those which are fitted with simple electronic components (e.g. resistors, diodes) and those which contain active electronic components and which work with the control panels for signalling and identifying, for example, an address or location.
9	EN 54-12	Smoke detectors - Line detectors using an optical beam	This European Standard specifies the requirements, test methods and performance criteria for line smoke detectors using attenuation of an optical beam, for use in fire detection systems installed in buildings.
10	EN54-13	Assessment of the compatibility	This document specifies the requirements for compatibility and connectability assessment of system components that either comply with the requirements of EN 54 or with a manufacturer's specification where there is no EN 54 standard. This document only includes system requirements when these are necessary for compatibility assessment. This document also specifies requirements for the integrity of the fire detection and fire alarm system when connected to other systems. This document does not specify the manner in which the system is designed, installed and used in any particular application. This document recognizes that it is not practical to assess the compatibility or connectability of components in all possible configurations. Methods of assessment are specified to reach an acceptable degree of confidence within pre-determined operational and environmental conditions. This document specifies requirements related to compatibility and connectability assessment methods and tests for the system components. This document is applicable to systems where the components are connected to control and indicating equipment and where the components are interconnected by electrical wires. For fire detection and fire alarm systems that use other means of interconnection (for example optical fibre or radio frequency links), this document may be used as guidance.
11	EN 54-16	Voice alarm control and indicating equipment	-
12	EN 54-17	Short-circuit isolators	-
13	EN 54-18	Input/output devices	This European Standard specifies requirements, test methods and performance criteria for input/output devices connected to a transmission path of a fire detection and fire alarm system, used to receive and/or transmit electrical signals to or from the transmission path, necessary for the operation of the fire detection and fire alarm system and/or fire protection system. An input/output device may be a physically separate device or its function may be integrated into another device in which case this European Standard may be used to assess this function. Control and indicating equipment, and ancillary control and indicating equipment (e.g. repeater panels and fire brigade panels) are not covered by this European Standard.
14	EN 54-24	Components of voice alarm systems. Loudspeakers	-
15	EN 54-25	Components using radio links	-
16	EN 54-15	Combination Fire detectors (Design standard)	Fire detection and fire alarm systems - Point detectors using a combination of detected fire phenomena. It is expected that this standard will be published from 2008-10.
17	EN 54-16	Evacuation Emergency Center (Design standard)	This European Standard specifies requirements, methods of test and performance criteria for voice alarm control and indicating equipment (VACIE) (see item C of Figure 1 of EN 54-1) for use in fire detection and fire alarm systems installed in buildings. This standard may also be used for the assessment of similar control and indicating equipment for use in systems where the alarm output is only in the form of alarm tones (no emergency message content). Although the scope of this standard does not cover emergency alarm systems for non-fire applications, it may be used as a basis for the assessment of the control and indication equipment for such systems. The VACIE may include combinations of emergency microphones, message stores, amplifiers, routing and prioritising matrices delay lines, equalization, and ambient noise level compensators. This standard does not specify requirements for such components as separate parts; they are tested as part of the VACIE as a whole. However, recommendations are made for standards that may be applicable to these components in informative Annex E. This part of EN 54 applies only to voice alarm control equipment for use in fire detection and fire alarm systems. The overall requirements of a voice alarm system, especially concerning audibility and intelligibility, are not covered in this part of EN 54. The manufacturer shall ensure compliance with this product standard. In addition the manufacturer shall consider requirements of an overall system that may affect the equipment design. Such system requirements may be specified in another part of this standard, in national legislation, codes and standards or in contractual documents.

_Table 3

European standard
EN 54 specifies
requirements for all
component parts of a
fire alarm system

3.2. National Legislation

Most EU countries now have their own national legislation of fire protection of premises, but not for residential buildings. The volume and rigidity of legislation caused to the presence of mandatory requirements for installation of fire protection. Currently, such requirements exist in several European Union countries.

In the UK an act to equip premises with fire detector came into force in 1991. All homes that were built from 1992 forward are required to have at least one main smoke detector on every floor. Thanks to this law the number of homes equipped with smoke detectors increased by more than 45%. Currently the more than 82% of all homes are equipped with a fire detector and it is proven that fires decreased significantly. The UK has set de facto standards. Its Institute for Standardization has developed and improved technical standards for fire equipment which has become the standard for other countries in the European Union and used in their legal basis for fire protection.

Today only a few European Union countries (Britain, Netherlands, France, Finland, and partly Germany and Belgium) have a legislative requirement to install smoke detectors in residential buildings and every year their positive experience attracts more countries to introduce such practices. Table 4 illustrates the legal requirements of some European countries in the field of fire protection.⁷

_ Table4
Fire protection requirements in European countries
* Denmark asks for emergency lighting only if the occupancy of a building exceeds 150 people.

Facility	England and Wales	Northern Ireland	Ireland	Scotland	Belgium	Denmark	Finland	Norway
Sprinklers	No	No	No	No	No	No	No	No
Emergency lighting	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No*	Yes	Yes
Signage	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Alarm	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No
Escape windows	No	No	No	No	No	No	Yes	Yes
Hose reels	No	No	No	No	Yes	No	No	No

In most European countries, the national technical standards are based on the European or British standards. Each country makes changes according to national characteristics and the need to strengthen existing regulations. Table 5 provides an overview of national technical standards for fire detectors in some European countries.

_ Table 5
National fire detection standards

N°	Country	Prefix	Main standards	Standardization Institute
1	United Kingdom	BS	BS5839 BS5588 BS7273, BS EN 60079-14 BS EN 50281-1-2	British Standards Institution (BSI)
2	France	NF	NF EN 14604 NF EN 54 NF 292 NF EN 50291	Association française de Normalisation (AFNOR)
3	Germany	DIN	DIN 14676 DIN EN 14604	Deutsches Institut für Normung (DIN)
4	Netherland	NEN	NEN2555: 2002 NEN2555-A1: 2006	National Standards Body of the Netherlands (NEN)
5	Belgium	NBN	NBN S 21 NBN EN 54 NBN EN 14604	Bureau De Normalisation (NBN)

At first glance it seems that national standards are not so important for manufacturers and suppliers of fire protection equipment, while compliance is voluntary in line with the European principle of free moving goods. European

reality is however much more complicated. Each European country has its own certification procedure of fire protection equipment up to national standards, officially set to provide additional proof of quality, reliability and conformity of products with national legislative requirements.

Significant differences in the standards of different countries and differences in certification requirements make certification a painful exercise. Certification takes a lot of time, is sometimes difficult and is an expensive process slowing down the free movement of goods. Certification hinders fair competition, because it reduces the number of players in the market and hinders implementation of national fire prevention programs. The only correct way out of this national market protection practices is European harmonisation on an unified approach to the certification of fire protection products throughout the European Union.

4. Need for European harmonisation

Harmonized European standards have a prominent role in the opening up of public procurement markets⁸ and the realisation of the Single Market. Through harmonisation technical barriers to trade are eliminated and are a tool to obtain the full economic benefits of the European internal market. The harmonisation of European standards is an economic objective in their own right. It allows the free move of goods with CE mark in the European Union and creates a fair playing field for increased internal trade and for European economic growth in general.

The latest approach to technical harmonization and standardization in the EU refers to voluntary standards as the appropriate method of giving technical expression to the essential requirements of Community Directives. This legislation confines itself to laying down the essential requirements to which products must comply in order to ensure the protection of public health, of safety, of the environment or of the consumer. European standards are developed in respect of each Directive.

European standards are developed in order to provide manufacturers with a set of technical specifications recognized in the Directive to verify compliance with the essential requirements. The European standards concerned, the so-called "harmonized standards" remain voluntary. Manufacturers are still able to put products on the community market which either meet other standards or no standards at all, subject to fulfilling the procedures for assessment of conformity laid down by the Directive.

The main motive for promoting any standardization activity is economic. The motivation for standardizing products, processes or services at the national level -namely, to reduce costs for producers and to improve transparency of the market for consumers – clearly exists at the European level. Given the current fragmentation of the European market, economic gains is much higher from European standardization than from previous national standardization. Common European standards reduce research, production and distribution costs for producers, and promote more intensive competition, to the benefit of consumers, in respect of the non-standard features of products.

Today, different countries have their own methodology for testing and certification of fire safety equipment. This creates a great inconvenience and problems in the classification and certificates recognition in some European countries. With the harmonization of technical standards for fire products all citizens can equally interpret and understand product requirements and will ensure that the product meets the legislation requirements.

One of the major advantages of harmonisation for manufacturers is that agreed standards of testing a product in one country should apply throughout Europe. There will be no need to repeat tests in each country, allowing manufacturers to save costs and to bring products to the market at a more competitive price.

The same holds for building standards. While national standards have helped to achieve quality in building, they vary widely from one Member State to the next and have acted as a technical barrier to international trade in construction products. Such barriers must be removed if there is to be more effective competition in the construction supply chain and on construction prices, within the EU Internal Market.⁹

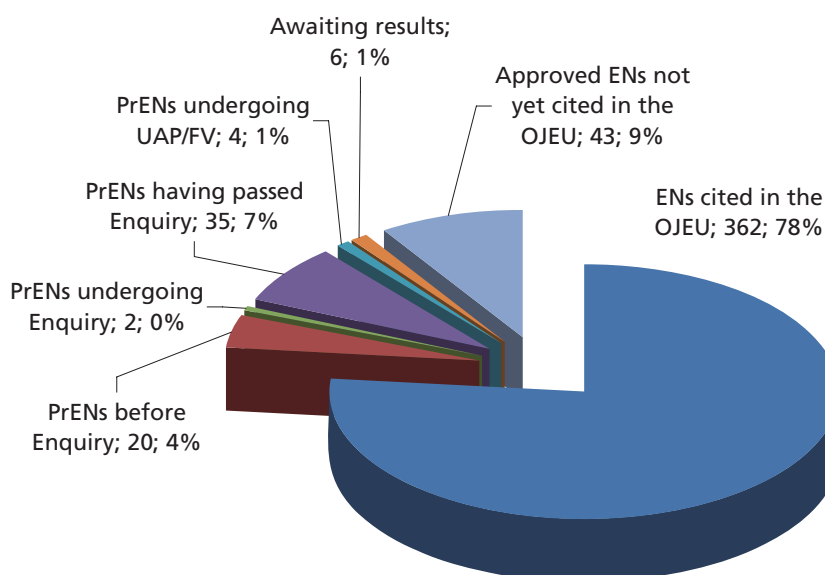
So far European harmonization on fire protection product standards has had already its benefits. Before the existing harmonisation level fire expertise was a pure national issue and investigations in the causes of fires were only carried out by nationals of the country in question. Before the harmonisation started it was difficult to ask for experts from other countries because of the different existing methods. Thanks to common standards technical relationships have highly increased in fire investigations resulting in better insight in causes of fire and increased insights in how to prevent them.

To address the problem of technical barriers to international trade caused by varying national standards, the EU adopted the Construction Products Directive (CPD)- 89/106/EEC- for the harmonisation of construction product standards.

TITLE	FINALIZED/HARMONIZED PRODUCT STANDARDS	OUTSTANDING STANDARDS
Fire alarm/detection, fixed fire-fighting, fire and smoke control and explosion suppression products	<p>1. Already cited</p> <ul style="list-style-type: none"> Fixed fire-fighting systems-components for gas extinguishing systems (EN 12094-1; EN 12094-2; EN 12094-3; EN 12094-4; EN 12094-5; EN 12094-6; EN 12094-7; EN 12094-9; EN 12094-10; EN 12094-11; EN 12094-12; EN 12094-13); Smoke and heat control systems (EN 12101-1; EN 12101-2*; EN 12101-3; EN 12101-6; EN 12101-10*); Powder systems (EN 12416-1; EN 12416-2); Hose systems (EN 671-1; EN 671-2); Components for sprinklers (EN 12259-1; EN 12259-2; EN 12259-3; EN 12259-4; EN 12259-5); Automatic sprinkler systems; foam systems (EN 13565-1); Fire alarm devices (EN 54-3); Powder supply equipment (EN 54-4); Heat detectors (EN 54-5); Smoke detectors (EN 54-7; EN 54-12); Flame detectors-Point detectors (EN 54-10); Fire detection and fire alarm systems-Manual call points (EN 54-11); Fire detection and fire alarm systems-Short-circuit isolators (EN 54-17); Fire detection and fire alarm systems-Input/output devices (EN 54-18); Underground fire hydrants (EN 14339); Pillar fire hydrants (EN 14384); Smoke alarm devices (EN 14604*); Fire detection and fire alarm systems – Part 20: Aspirating smoke detectors (EN 54-20); Fire detection and fire alarm systems – Part 21: Alarm transmission and fault warning routing equipment (EN 54-21); Fixed firefighting systems – Components for gas extinguishing systems – Part 8: Requirements and test methods for connectors (EN 12094-8); Fire detection and fire alarm systems – Part 2: Control and indicating equipment (EN 54-2); Voice alarm control and indicating equipment (EN 54-16); Loud speakers (EN 54-24); Components using radio links and system requirements (EN 54-25); 	<ul style="list-style-type: none"> Components for gas extinguishing (prEN 12094-20) Smoke control ducts (prEN 12101-7); Specification for smoke control dampers (prEN 12101-8); Control panels (prEN 12101-9) Pressure switches(prEN12259-8) Deluge valve assemblies (prEN 12259-9) Components for sprinkler and water spray systems – Part 12: Pumps (prEN 12259-12) Point detectors using a combination of detected fire phenomena (prEN 54-15) Line type heat detectors (prEN 54-22); Visual alarms (prEN 54-23); <p>Fire detection and fire alarm systems – Part 26: Point fire detectors using carbon monoxide sensors (prEN 54-26)</p> <p>Addition to work programme</p> <ul style="list-style-type: none"> Ventilation for buildings - Duct mounted fire dampers (prEN 15650*) Note: CEN/TC 156 is working on a new response to the mandate M/109. Ventilation for buildings - Fire resisting duct sections (prEN 15871) NOTE: CEN/TC 156 is working on a new response to the mandate M/109.

Fire protection standards harmonization¹²

*the standards are the subject of QUERIES

CEN harmonization process¹⁰

The differences are not great between the EU member states and where they are, reconciliation should not be too difficult. The biggest obstacle to harmonisation will be political rather than professional, with some countries not wishing to hand over any sovereignty at all (as is presently being experienced in the UK) [6].

5. What can house owners do?**1. Basic rules for all¹¹**

- _ Install smoke detectors at every floor of your home and outside sleeping areas. Test every detector at least once a month. Keep smoke detectors dust free. Replace batteries with new ones at least once a year, or sooner if the detector makes a chirping sound.
- _ Install and maintain heating equipment correctly. Don't leave space heaters operating when you're not in the room. Keep space heaters at least three feet away from anything that might burn, including the wall. When lighting a gas space heater, strike your match first, then turn on the gas. Have your furnace inspected by a professional prior to the start of every heating season.
- _ Check the gas hose every year.
- _ Heating equipment regularly maintained: the chimney and flues should be cleaned out once a year (required for insurance and especially if we heat with oil or wood). The best method is the mechanical sweeping performed by qualified professionals.
- _ No unnecessary fuel storage (cardboard, paper) and flammable products (alcohol, petrol) especially near sources of heat. Allow flammable products away from heaters, lights, candles, hot plates etc.
- _ In the kitchen, do not let appliances connected that are unused. Electrical shortcuts can also happen when appliances are unused, but still connected to the electricity network.
- _ Never smoke in bed in the room. Extinguish cigarettes completely. Fires occur while people fall asleep with a lit cigarette.
- _ Do not use alcohol or petrol to light the fireplace or barbecue. Use a fireplace screen to prevent sparks from flying.

- _ Have a fire extinguisher at home. Learn how to use your fire extinguisher before there is an emergency.
- _ Teach every family member to "Stop, Drop, Roll and Cool" if clothes catch fire by dropping immediately to the ground, crossing hands over your chest and rolling over and over or back and forth to put out the flames. Cool the burned area with cool water and seek medical attention for serious burns.

2. Children

- _ Never leave young children alone in an apartment or a house. In case of fire, there is a good chance they will be trapped by the smoke. Grown ups might know they have to crawl over the floor to avoid inhalation of smoke, but children stay up and start to scream.
- _ Do not let children play with open flames (matches, lighters, candles). Give them a flashlight to play safely in the dark.
- _ Never leave pots, pans or dishes on the fire unattended.
- _ Teach children that fire is dangerous and it hurts.
- _ Teach them as soon as possible to use the phone and dial firefighters.
- _ Teach them the right attitudes to fire, how to crawl on the floor if smoke invades room and how to manifest the window.
- _ Do not put up heating in their room.

6. What can politics do?**1. Short term**

On the short term politics is able to decrease rapidly at least 10% of the number of deaths by home fires and implicitly decrease the accidental fire death and victims for a much longer period to come through:

- _ Adoption of a law on compulsory installation of smoke detectors in private homes. The occupant shall be the first responsible for his own safety. Such a law has to accommodate the process in which the occupant buys a smoke detector, installs it, and maintains it. The law has to leave the options open for more sophisticated systems f of remote monitoring, which are currently offered and installed by insurance companies and banks.
- _ Using media prime-time to promote the fire prevention companies and accompany the law on compulsory installation of smoke detectors in private houses.
- _ Start the investigation of fire causes with substantial financial resources and political will. This will create statistics of fire causes in European countries and help to develop effective measures to prevent fires in buildings.

2. In the medium term serious deficiencies found in private and communal buildings can be addressed by:

- _ Setting basic requirements for the safe use of electrical installations, without replacing the entire system. For example French company Promotelec issued Guidance of safekeeping of an existing electrical installation in housing, which suggest the 5 basic rules for providing simple and inexpensive electrical safety of the existing housing¹² :
 - _ Presence of a central switch for all electricity.
 - _ Presence of a residual-current device (RCD).
 - _ Presence of a connection to the ground, in particular in bath rooms and kitchens where water is used.

- _ Presence of a fuse box, in particular a Residual Current Circuit Breaker (RCCB).
- _ Absence of any risk of direct contact with parts under electrical current which may cause electrocution/
- _ Prohibit flammable foam padding material for furniture.
- _ Provide an instruction sheet to tenants upon renewal of lease describing the best practices of security against the risk of fire.
- _ Regulate the processes of thermal insulation or sound from the outside to limit the increase in the risk of fire.

3. Long term

These measures require strong political will and an important legislative work:

- _ Strengthen and make binding recommendations on the safety of persons and protection against fire. This includes prohibiting the paneling, coatings fuel in the common parts of buildings, forcing the creation of closed spaces for storage bins, prams and strollers. This must be accompanied by the introduction of security lighting on the stairs. The replacement of gas mains lead with steel pipes in the common areas of apartment buildings is desirable.
- _ Expand the duties of firefighters to communication activities in schools, calendars or trucks for example.
- _ Impose periodic checks of common security equipment and their maintenance. And make them subject to imposed controls and sanctions.
- _ Promote fire detectors, sprinkler installations or fire extinguishers with tax incentives or financial assistance.

7. What has Luxembourg done?

In 2008 there were more than 2300 fires occurred in Luxembourg¹³. An estimation of the costs of the damage caused by fires is each year tens of millions euro. Over 50 businesses suffer a fire every year in Luxembourg. More than half of these businesses close their doors in five years.¹⁴

In Luxembourg there are no national fire standards. Luxembourg applies European standards, especially the German DIN or VDE standards. Prescriptions on fire safety are also initiated from the Inspection of Labour for the so-called "classified establishments" and from the Fire Prevention Office of Luxembourg's City Career Fire Brigade. General prescriptions - based on Belgian regulations - divide the buildings according to their height. Specific prescriptions - based on French and German regulations - make the difference between non-classified (all sorts of habitations) and classified establishments (for example the number of persons to be accommodated in a concert hall, surface of an office building...). There are also specific rules - based on the European directive for building materials - for all kinds of architectural / structural cases (eg restaurant, cinema, underground parking, etc.).¹⁵

Luxembourg intends to enhance the cooperation with the European Fire Protection Association because the CTIF Commission cooperates in the development of common security standards to achieve common standards in Europe. The guidelines are primarily designed for safety of firms and organizations, as well as fire departments or insurance companies.

Today in Luxembourg the Kommodo-Inkommodo Act classifies buildings according to their potential danger to people and the environment. However, recently the law was adapted to the purely environmental protection and now does not affect much in fire protection.

In the nineties the Luxembourg government tried to create a National fire protection Act but that attempt failed. Today Luxembourg has no proper fire protection legislation. Under the Kommodo-Inkommodo Law in 2003 a number of Directives governing fire safety were published. Today these Directives are used as technical regulations and therefore are not controlled by Brussels.

Olga Mala Assystem, Luxembourg

Siemon Smid Assystem, Luxembourg

Igor Mysevych Arton, Ukraine

- 1_ Ben Best, Causes of Death, <http://www.benbest.com/lifeext/causes.html>
- 2_ NIFS (2009) Consumer fire safety: European statistics and potential fire safety measures. Netherlands Institute for Safety Nibra, the Netherlands
- 3_ CTIF (2008) World Fire Statistics, Report No. 13, Centre of Fire Statistics of CTIF, Belgium.
- 4_ Ontario Stove Top Fire Survey (2006): <http://www.ofm.gov.on.ca/ENG-LISH/FireService/announcements/2006/PDF/Stove%20Top%20Fire%20Survey%20Summary%20PRINT.pdf>
- 5_ Rural/Metro Fire Department (1997) Automatic sprinklers, a 10 year study. A detailed history of the effects of the automatic sprinkler code in Scottsdale, Arizona. Rural/Metro Fire Department, Scottsdale, AZ.
- 6_ Melinek (1993) Potential value of sprinklers in reducing fire casualties. Fire safety journal 20, p. 275-287.
- 7_ ISURV, (2008) http://www.isurv.com/site/scripts/news_article.aspx?newsID=16
- 8_ BENEFITS AND DISADVANTAGES OF THE EUROPEAN STANDARDIZATION Sergio López Castillo, AFITI LICOF, Spain; in: FIRE & BUILDING SAFETY IN THE SINGLE EUROPEAN MARKET DOES CE COMPLIANCE ENSURE FIRE SAFETY?, 12th November 2008 - Royal Society of Edinburgh
- 9_ <http://www.environ.ie/en/Publications/DevelopmentandHousing/BuildingStandards/FileDownload,1659,en.pdf>
- 10_ [9] CEN, (2009) <ftp://ftp.cen.eu/cen/Sectors/List/Construction/CENreport.pdf>
- 11_ <http://www.inpes.sante.fr/70000/dp/04/dp041019.pdf>
- 12_ <http://www.promotelec.com/technique/espaceinfo/5PointsSecuElectrique.pdf>
- 13_ INTERVENTIONS 2008. Division d'incendie et de sauvetage. Administration des services de secours, Luxembourg
- 14_ Prévention du risque d'incendie dans les entreprises. Conseils pratiques, http://www.axa.lu/pdf/protection_entreprises.pdf
- 15_ Fire Prevention: Exchanges Soaring, http://www.ctif.org/spip.php?action=cookie&url=%2FFire-Prevention-Exchanges-Soaring&var_lang=de

Manufacturing Execution Systems

L'informatique au service de la production industrielle: optimisation des performances par l'utilisation des MES_

1 Contexte économique et objectifs des MES

Selon le Statec (cf. www.statec.lu), en 2008, le Grand-Duché a exporté plus que 10 milliards d'euros de biens manufacturés. En 2006, on dénombrait environ 38.000 personnes travaillant dans l'industrie, dans environ 1000 entreprises. Ces statistiques soulignent l'importance de l'industrie luxembourgeoise pour le bien être économique du pays. La promotion de l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans la production est l'une des mesures possibles pour favoriser et améliorer cette industrie.

Manufacture et MES (Manufacturing Execution System)

Les TIC ont le potentiel de rendre les processus de fabrication plus efficaces et d'améliorer la qualité des produits. Un tel support peut survenir à différents niveaux d'opération. Les Manufacturing Execution Systems (MES) sont logiquement situés au-dessus du niveau des régulateurs des machines de production, donc au-dessus des Automates Programmables Industriels ou API¹.

Ces deux couches liées directement à la production doivent interagir avec le système informatique général de l'entreprise, souvent appelé ERP (Enterprise Resource Planning) que nous illustrons en figure 1.

La meilleure manière de décrire la différence entre ces systèmes est de regarder l'horizon temporel des données et des processus qu'ils contrôlent et génèrent. Les PLCs gèrent et contrôlent en temps réel toute étape de la production pour chaque machine. Souvent, ils n'ont pas la notion du niveau de lot supérieur – le niveau où les systèmes MES opèrent.

Leurs objectifs sont :

- _ gérer et contrôler de manière permanente, l'ensemble des traitements par lots ou étape d'une production continue
- _ collecter et générer les données en rapport à la qualité de ces traitements et son contexte

Tout cela dans une fenêtre de temps qui peut être de l'ordre des secondes, minutes ou heures.

Au-dessus de ce niveau, l'ERP supporte la vision à moyen et long terme de la gestion des objectifs de production et des processus opérationnels.

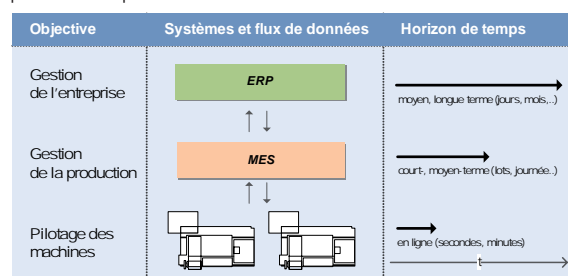


Figure 1 : L'emplacement logique des MES dans l'architecture informatique

Vue fonctionnelle des MES

La notion de MES est apparue dans les années 1990. L'organisation conductrice dans le développement des standards et des définitions, la MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association), y a publié son modèle fonctionnel du MES. Ce modèle décrit les 11 fonctionnalités principales d'un MES (comme définit par la MESA) : *Dispatching production units, Operations / detailed scheduling, Production tracking & genealogy, Labor Management, Quality Management, Maintenance Management, Resource Allocation & Status, Performance Analysis, Data collection acquisition, Document control, Process management*.

Scholten (B. Scholten: « MES Guide for Executives: Why and How to Select, Implement, and Maintain a Manufacturing Execution System », 2009)) donne un résumé simplifié de ces fonctions : « [un MES] prépare et gère les instructions de travail, suit l'exécution correcte des processus de production, rassemble et analyse les informations concernant les processus de production et les produits, [...] et résout les problèmes d'optimisations des processus ».

En 1995, l'ISA (International Society of Automation) a publié son standard ISA95 qui est devenu une base solide pour classer les produits et définir la terminologie des MES. Les

systèmes MES sont placés au niveau 3 du modèle hiérarchique de contrôle de la manufacture (figure 2 et 3). Sur ce niveau, les fonctionnalités mentionnées précédemment sont réalisées par des systèmes intégrés dédiés.

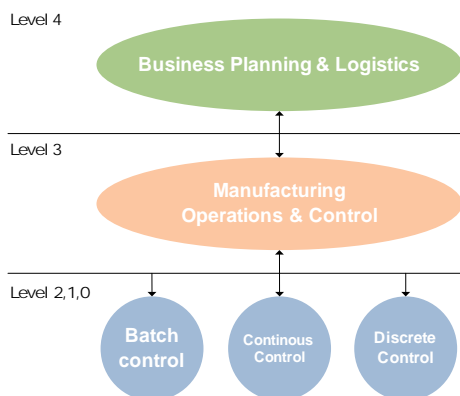


Figure 2: Niveaux de gestion de production d'après ISA95

Le standard ISA95 décrit en détail les flux entre ces modules et les couches fonctionnelles. Ces flux sont décrits d'une manière générale dans la figure 3

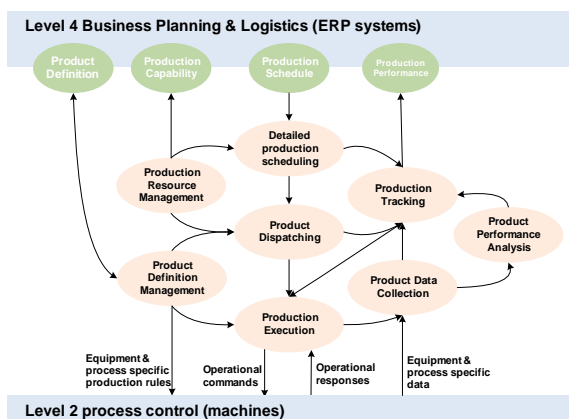


Figure 3: Flux de données et contrôles entre les fonctionnalités d'un MES et les couches limitrophes

Vision des données d'un MES

Un objectif clé des MES est de générer les données sur les processus de production. Il n'y a pas d'assurance qualité ou de gain d'efficacité possible sans vérification des données sur l'usage des machines et la production effective. L'acquisition et la disponibilité permanente de ces données peuvent renseigner les opérateurs et l'administration sur les stratégies et améliorations à adopter. En 2009, l'organisation Allemande VDMA a défini pour ces membres (VDMA *Einheitsblatt* 66412) un catalogue d'une vingtaine de KPI différents (*Key Performance Indicators*) – données clés pour la gestion de la production qu'un MES doit fournir. Le document définit en détail ces indicateurs. Entre-temps, ce catalogue sert de base à un groupe de travail de l'ISO afin de définir un standard international (série ISO 22400). Un objectif est de faciliter la comparaison entre différents processus de fabrication, les lieux, etc.

La figure 4 résume les domaines concernés par ces KPI et les autres données qu'un MES peut fournir :

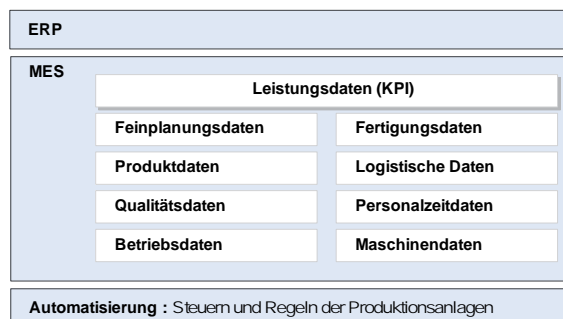


Figure 4: Domaines des données gérées et générées par un MES (source : VDMA Einheitsblatt 66412)

Les MES dans la réalité industrielle

Comme illustré, les entreprises visent à améliorer leur compétitivité avec le déploiement des MES, en ayant une plus grande transparence et une meilleure traçabilité de leurs productions.

Souvent, les fonctionnalités et couches présentés dans cette première partie ne sont pas facilement identifiables, puisque la réalité dans les entreprises est très hétérogène. Par exemple, les grands producteurs des systèmes ERP (comme SAP) essaient de fournir eux-mêmes des fonctionnalités MES. À l'opposé, les producteurs des machines offrent de plus en plus de fonctionnalités relevant des MES dans leurs systèmes. Enfin, il y a un marché pour les MES dédiés, avec une grande diversité en ce qui concerne leurs capacités.

Dans les prochains paragraphes, nous allons présenter une approche technique pour le développement des systèmes MES qui vise à répondre aux défis d'une hétérogénéité énorme, notamment pour les PME.

2 Le développement de systèmes MES: l'approche IPROME

L'objectif du projet IPROME (*Initiative for the Promotion of Manufacturing Execution Systems*) du département ISC du Centre de Recherche – Gabriel Lippmann est de proposer, aux entreprises luxembourgeoises intéressées, des systèmes informatisés de suivi de production (MES) innovants et facilement adaptables aux besoins spécifiques de chaque entreprise.

Objectif final : s'adapter à tous

Cette flexibilité recherchée est un véritable défi puisque chaque entreprise possède une structure unique. Dès le début du projet, nous avons étudié les architectures et les méthodes nécessaires pour atteindre ces objectifs de flexibilité et de généricité. Nous avons pris pour exemple, l'histoire des ERP qui ont vu la même contrainte lors de leurs constructions.

Comment les ERPs ont atteint cette flexibilité ?

Avant l'arrivée des systèmes ERP, les entreprises possédaient une solution informatique pour chaque domaine de l'entreprise (comptabilité, gestion des ressources humaines,...). L'inconvénient de cette architecture très fragmentée venait dans l'impossibilité de faire communiquer toutes ces briques logicielles. Deux idées principales ont vu le jour pour régler ce problème. La première était de dé-

finir des standards de communication entre les différents logiciels disponibles dans une entreprise. La deuxième idée principale était de remplacer toutes les applications de l'entreprise par une application unique. C'est cette dernière solution qui a rencontré un grand succès: l'ERP.

Créer un ERP de toute pièce pour une entreprise est une tâche qui se révèle très coûteuse en temps comme en argent, avec des risques d'échec de l'intégration assez importants. Les éditeurs d'ERPs ont donc cherché à proposer des solutions génériques, qui pouvaient s'installer dans n'importe quelle entreprise. Proposer une solution unique d'ERP présente deux avantages. D'une part, pour les éditeurs, on ne gère qu'un seul produit. Ce qui évite les développements spécifiques et diminue les coûts de maintenance. Le deuxième avantage est de profiter du retour d'expérience. L'idée est de faire remonter les nouvelles fonctionnalités demandées par certains clients qui n'existent pas encore dans l'ERP. Si une fonctionnalité peut être utile à d'autres entreprises, l'éditeur va l'intégrer à sa solution principale. Tous les clients pourront donc en bénéficier lors de la prochaine version de l'ERP. On a donc un outil qui va s'améliorer, grandir, et qui au fur et à mesure des expériences, sera capable de convenir à de plus en plus d'entreprises.

Constat de la démarche des ERPs.

Si la notion de capitalisation des connaissances est primordiale, son implémentation dans le cadre des ERPs a conduit à certaines limites:

Les ERPs devenant de plus en plus riches, ils deviennent aussi de plus en plus imposants et complexes, ce qui rend leurs intégrations moins faciles. Pour remédier à cela, les éditeurs ont découpé leurs solutions en modules suivant les domaines fonctionnels. De plus, certaines versions ont vu le jour pour des secteurs particuliers (textile, chimie, ...). On constate aussi l'apparition de versions plus légères spécialement conçues pour les PME.

Mais la principale limite de ce système repose sur les différentes variantes des objets utilisés dans les entreprises.

Est-ce que la notion d'atelier ou de machine, par exemple, au sein de l'ERP est la même que pour l'entreprise?

L'intégration d'un ERP doit se faire dans les deux sens. L'idée selon laquelle l'ERP seul s'adapte à l'entreprise est fautive. Pour réussir cette intégration, l'entreprise doit aussi adapter sa structure et son mode de fonctionnement. Car même si l'ERP est paramétrable, du fait de sa taille, il ne permet pas de faire de nombreux développements spécifiques.

Un MES « générique » ?

Obtenir un MES « générique » ne représente par les mêmes contraintes que la construction d'un ERP « générique ». Un ERP traite de nombreux domaines hétérogènes. La plupart de ces domaines sont toutefois communs pour un grand nombre d'entreprise. Par exemple, en ce qui concerne la comptabilité, toute entreprise est soumise aux mêmes règles de base comme l'édition d'un bilan ou d'un compte de résultat. Ce caractère commun aide dans la construction d'un logiciel générique. Un ERP, contrairement au MES, n'est pas en relation directe avec la production. Il va stocker toutes les informations relatives à la production, mais ne va à aucun moment dialoguer avec les machines.

Le MES, quant à lui, ne s'intéresse qu'aux domaines fonctionnels relatifs à la production. Le MES a un rôle de pilotage, il dirige la chaîne de production en donnant les ordres aux machines. Il se trouve donc directement relié au support physique, plus ou moins informatisé. Cette contrainte pose de nombreux problèmes, car on ne connaît jamais le niveau d'informatisation d'une chaîne de production. Est-ce que toutes les machines possèdent les entrées et sorties nécessaires pour communiquer avec le MES ? Dans de nombreux cas, l'absence de normes pour la communication ou bien la présence d'un protocole propriétaire rendent la tâche encore plus complexe.

Enfin, même si le domaine fonctionnel est restreint à la production, on peut énumérer un grand nombre de processus de fabrication hétéroclites. On peut prendre comme exemple la gestion des quantités. Pour la production de pièces automobiles on va souvent gérer des unités simples (des pièces ou un nombre de pièces par lot). Alors que pour un produit chimique, on va gérer des quantités plus complexes tel que les liquides.

Pour ces raisons, la mise en place d'un MES « générique » comme on en trouve pour les ERPs n'est pas approprié. Le caractère trop spécifique de la chaîne de production et plus généralement des processus de fabrication ne permettent pas de dégager une solution simple à mettre en place et à utiliser.

IPROME : à chaque structure, son MES

IPROME n'est pas un MES générique mais un générateur de solution MES. L'idée principale est de modéliser la structure de l'entreprise afin d'obtenir un MES qui convient parfaitement aux besoins de l'entreprise. C'est ce que l'on appelle une ligne de produit logiciel (Software Product Line). De la même manière qu'une chaîne de production automobile est capable de construire une voiture avec différentes options, IPROME est capable de construire des MES ayant un noyau commun et des fonctionnalités sur mesures.

Le terme « modèle » utilisé dans cet article fait référence au contexte informatique. En informatique, un modèle a pour objectif de structurer les données, les traitements, et les flux d'informations entre les entités. Le rôle premier des modèles est celui de traducteur, afin d'informatiser des systèmes. Par exemple, on va modéliser un système de facturation afin de remplacer un ancien système papier par un logiciel envoyant des courriels. Le langage de modélisation le plus connu et le plus utilisé est UML (Unified Modeling Language).

Un effort très particulier a été apporté à cet aspect de modélisation puisque nous avons créé des éditeurs graphiques, afin de transcrire plus facilement l'entreprise en modèle. Ces éditeurs proposent une interface simple afin de créer et de positionner les différents éléments du modèle. Dans le futur, certains de ces éditeurs pourraient même directement être utilisés par les utilisateurs finaux, afin de se positionner au plus près de leurs attentes.

Comme illustré en figure 5, une fois cette modélisation terminée, on va utiliser le générateur intégré à IPROME pour produire automatiquement une très grande partie du code source. Le programme en sortie sera une application classique de type client/serveur où les clients sont par exemple

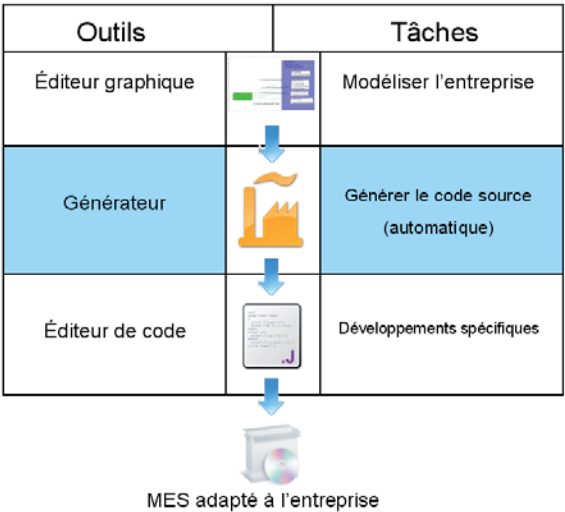


Figure 5 - Processus de création de MES avec IPROME

un opérateur, un responsable de production ou bien encore une machine. Le serveur repose sur une architecture SOA (Service Oriented Architecture), la communication entre un client et le serveur ne repose que sur l'utilisation de services. Un service est une fonctionnalité bien définie. C'est un composant autonome qui ne dépend d'aucun contexte ou service externe. Avec ce type d'architecture, le rôle du client se limite à utiliser ces services et à proposer une interaction avec l'utilisateur. Tous les calculs ou opérations en rapport avec la production se trouvent dans la partie serveur.

L'application générée repose sur le langage Java et la plateforme JEE (Java Enterprise Edition).

Nous avons fait le choix d'utiliser des technologies reconnues et éprouvées comme Java qui est un langage objet très répandu dans le développement d'applications d'entreprises. Cette précision sur les technologies est non négligeable car une fois générée, l'application doit encore être complétée par quelques développements.

Pourquoi ne pas proposer une génération totale de l'application?

Pour générer un composant du MES, il faut que ce dernier puisse être modélisé en amont. C'est à dire que l'on doit comprendre et mettre en place une syntaxe suffisante pour illustrer tous les cas possibles. Hors, certains calculs ou traitements de la production sont très difficiles à modéliser.

Difficile ne veut pas dire impossible, mais il ne faut pas oublier que le but premier de la modélisation est d'ajouter une couche d'abstraction supplémentaire qui permet de simplifier le développement. Cette couche n'est utile et ne doit être mise en place que dans les cas où elle sera simple à utiliser. Dans le cas contraire, il vaut mieux utiliser des méthodes de développements classiques.

Un exemple qui illustre bien ce cas est la communication entre les machines et le MES. Il existe actuellement peu de normes réglementant la communication avec ces machines et encore moins de machines qui les appliquent. Il est donc presque impossible de pouvoir proposer une modélisation commune à toutes les machines existantes. Dans ce cas, il vaut mieux générer un squelette qui sera complété par un développeur. Ce qui est d'ailleurs proposé dans IPROME, c'est de rendre ces développements plus faciles en séparant correctement le code généré et le code non généré.

IPROME repose donc sur une architecture hybride entre une solution toute faite et une solution sur mesure.

Paramétrer ou modéliser?

La principale différence par rapport à des solutions toutes faites, est qu'avec IPROME, nous utilisons de la modélisation au lieu d'un paramétrage. Nous allons donc éviter de travailler sur l'analyse des écarts comme cela est fait entre un ERP et l'entreprise par exemple.

Puisque nous utilisons la modélisation, nous pouvons être sûrs que les notions comme le poste de production sont exactement les mêmes (même définition et même propriétés) pour IPROME et l'entreprise.

Contrairement à l'intégration d'un MES générique, chaque concept de l'entreprise est respecté. L'entreprise n'a donc pas besoin d'apporter de grands changements à son organisation pour accueillir un MES venant d'IPROME.

3) Architecture basée sur les modèles

L'ingénierie dirigée par les modèles

Comme expliqué dans la partie précédente, IPROME repose sur l'utilisation intensive des modèles. C'est ce que l'on appelle l'ingénierie dirigée par les modèles ou MDE (Model Driven Engineering). Le principe de cette démarche est de se focaliser sur les concepts du domaine étudié, en utilisant des modèles, au lieu de se focaliser sur les aspects techniques ou algorithmiques.

MDE est une méthodologie assez ouverte, elle ne propose aucune règle de développement précise ou de technologies à employer. L'intérêt pour le MDE a été amplifié en novembre 2000, lorsque l'OMG (Object Management Group) a proposé et soutenu le MDA (Model Driven Architecture) qui est une implémentation de MDE.

Au centre du MDE ou MDA il y a la notion de modèle mais aussi de méta-modèle. On peut considérer un méta-modèle comme étant la définition d'un modèle.

Dans la suite de l'article nous utiliserons le terme de MDE qui reste la notion la plus générique quand nous parlons d'ingénierie dirigée par les modèles.

Relation entre méta-modèle et MES

Dans IPROME, le but est d'obtenir un modèle de MES pour chaque structure d'entreprise. Afin d'assurer une cohérence entre tous ces modèles et d'identifier les différents éléments lors de la génération de code, on utilise un méta-modèle représentant tous les concepts d'un MES. Un modèle résultant de l'analyse d'une entreprise est considéré comme valide que s'il respecte la structure du méta-modèle.

Un éditeur de modèles MES

Afin de pouvoir facilement construire ces modèles MES et de vérifier qu'ils ne contiennent pas d'erreurs, nous avons

utilisé les frameworks EMF et GMF de l'outil de développement Eclipse pour créer des éditeurs dédiés à cette tâche. Ces éditeurs vont donc proposer une vue entièrement graphique pendant la phase de construction d'un modèle. L'avantage principal de ce type de vue est que le modèle devient compréhensible pour n'importe quel utilisateur. De plus, la navigation et les modifications sont plus faciles à opérer par rapport à d'autres supports comme les fichiers XML ou texte.

Ces éditeurs ont été créés à partir de notre méta-modèle de MES. Nous pouvons y choisir le mode de représentation (formes, couleurs) pour chaque concept. Quelques règles supplémentaires qu'il aurait été difficile d'implémenter directement dans le méta-modèle ont aussi été ajoutées à l'éditeur. Les modèles obtenus par ces éditeurs sont enregistrés très simplement au format XML. Ils nous serviront de matière première pour la génération de code.

Dans le cadre d'IPROME, nous avons défini deux éditeurs. Le premier porte principalement sur l'aspect fonctionnel du MES. On y décrit les entités du système avec leurs interactions. Le deuxième concerne un aspect technique: la manière de charger les structures de données.

Sur la figure 6, chaque couleur fait référence à un concept du méta-modèle. On peut remarquer que la structure du modèle est très proche d'un diagramme de classes classique tel qu'utilisé en UML. On pourrait parler de diagramme de classe « décoré ». Cependant, nous avons aussi modélisé d'autres concepts comme un diagramme d'état pour les machines. Cet éditeur fait donc la jointure entre plusieurs aspects fonctionnels et la structure des données. Nous avons donc créé notre propre DSM (Domain Specific Modeling), un langage de modélisation spécialement conçu pour représenter les systèmes MES.

Différence entre MDE et simple génération de code

Contrairement à une génération de code classique, avec un développement logiciel reposant sur MDE, on utilise le méta-modèle qui est un véritable référent lors de la modélisation et de la génération de code.

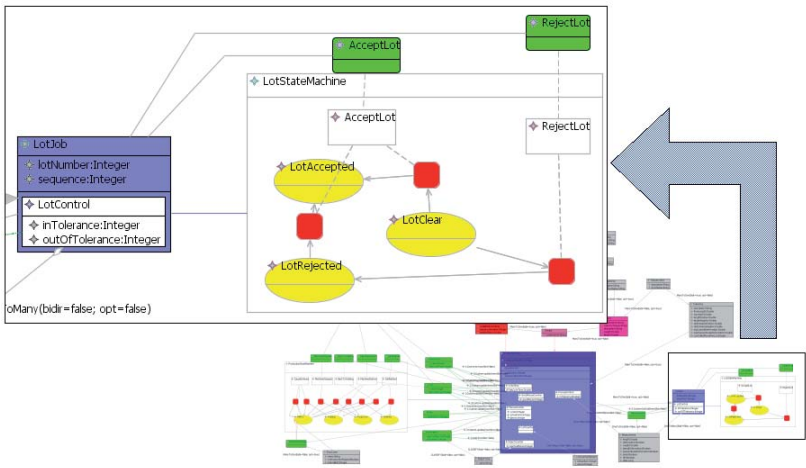


Figure 6 - Exemple de modèle MES obtenu par l'éditeur

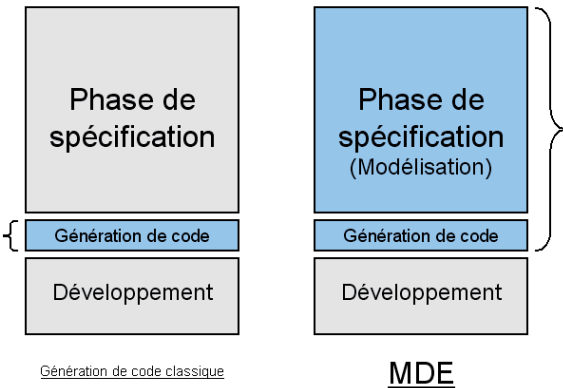


Figure 7 - Différence entre MDE et génération de code classique

Sur la figure 7, la phase de spécification est l'étape où l'on réalise, de manière générale, la conception du logiciel (recueil des besoins utilisateurs, choix des technologies, conception de l'architecture, ...).

Un outil de génération de code classique ne va intervenir qu'à un seul moment précis de ce processus. Dans la

plupart des cas, ce type d'outil n'est utilisé que pour gagner du temps en générant tout le code simple comme les structures de données. Ceci dans le but de réduire la durée de la phase de développement.

Puisque le méta-modèle est conçu pour un domaine particulier, il nous permet de générer des concepts difficiles à obtenir avec une génération standard. C'est le cas de tout ce qui touche au code fonctionnel (l'interaction entre les données). Avec nos éditeurs, nous pouvons, par exemple, modéliser le fait qu'un événement comme l'arrêt d'une machine entraîne la mise à jour de l'état du processus de production concerné.

Le générateur de code

Le méta-modèle n'est pas seulement utilisé pour la définition des éditeurs ou vérifier la cohérence d'un modèle. Il nous permet aussi d'écrire un générateur de code, pouvant prendre en entrée n'importe quel modèle respectant le meta-modèle. Cette caractéristique est très importante, puisque cela nous permet de bénéficier d'un générateur unique pour tous les modèles possibles.

La syntaxe du générateur va donc reposer sur celle du méta-modèle. On appelle chaque module du générateur un template. Ce sont ces templates qui vont écrire le code dans le langage souhaité.

La génération de code: une phase très souvent négligée

La plupart des articles décrivant les bénéfices et les méthodologies d'une démarche MDE font très souvent l'impasse sur un point capital du système : la génération de code. Il ne faut jamais perdre de vue que le but final est d'arriver à une application qui présente la robustesse et les performances nécessaires pour être utilisée en entreprise. Hors, la création d'un générateur est une tâche onéreuse et difficile, car elle demande une bonne compréhension de la technologie générée. En négligeant ces aspects, on prend le risque de se retrouver avec une application qui, dans le meilleur des cas, présente des problèmes de performances et, dans le pire des cas, ne fonctionne même pas.

Le paragraphe suivant présente la résolution d'une problématique directement liée au choix des technologies. Ce cas introduit l'idée que la phase de modélisation ne peut pas être entièrement indépendante des technologies choisies. L'approche pragmatique adoptée sur IPROME nous a fait comprendre que pour réussir un développement basé sur MDE, il convient de maîtriser les technologies utilisées par l'application finale, dans le but de connaître les concepts ou propriétés à faire remonter dans la modélisation.

Exemple de contrainte: le chargement de données

Le choix des technologies finales, celles utilisées par l'application générée, peut avoir un véritable impact sur la manière de modéliser. Nous avons été confrontés à ce problème avec l'utilisation du framework Hibernate. Hibernate est un framework de persistance de données qui permet d'enregistrer ou de lire des objets Java en utilisant une base de données. Une des problématiques les plus connues avec ce type de framework est celle du lazy-loading (chargement paresseux). Les objets étant parfois en relation avec d'autres objets (un objet « Personne » utilise un objet « Adresse » par exemple), il est difficile de définir la manière de charger les données pour l'utilisateur. Si l'on charge la totalité de l'arborescence, on risque d'obtenir de très mauvaises performances. Au contraire, un chargement insuffisant est tout aussi inefficace, car l'on doit faire de très nombreux appels aux services pour obtenir les données voulues. Comment trouver un moyen de configurer un chargement complet ou partiel ? La solution appliquée dans IPROME a été de développer un deuxième éditeur qui va compléter le modèle existant. Cet éditeur va proposer des options pour définir les stratégies de chargement des entités. Cela nous permet aussi de gérer des chargements plus complexes, demandant d'intervenir sur des arborescences à plusieurs niveaux.

Un autre aspect nous a contraint à faire attention à l'application générée. Comme expliqué précédemment, on ne peut pas modéliser tous les principes des MES à cause de règles trop complexes. Il convient donc de fournir une application avec des parties à compléter par un développeur.

Ces parties doivent être identifiables pour faciliter les développements et conservées si l'on relance la génération de code. La solution mise en place est d'utiliser intensivement l'héritage objet. Cela permet notamment de séparer le code généré et non généré dans deux fichiers différents. De notre retour d'expérience, c'est la solution la plus simple à mettre en oeuvre et la plus lisible pour le développeur.

Conclusion et appel

Les possibilités offertes par l'intégration des MES dans la production sont énormes. Les grandes entreprises, qui ont souvent installé ou développé la première génération de ces systèmes pendant les années 1990, sont en train de moderniser leurs applications, en profitant au maximum des avancées technologiques.

Cependant, il existe un nombre important de PME au Luxembourg qui n'exploitent pas encore les avantages des MES.

Afin d'aller plus loin, l'équipe du projet IPROME du Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann souhaiterait sensibiliser, notamment les PME luxembourgeoises, au potentiel des systèmes de type MES pour optimiser leurs productions. Dans le cadre du projet en cours, nous proposons le développement de démonstrateurs présentant notre approche aux entreprises intéressées.

N'hésitez pas à contacter les auteurs pour obtenir de plus amples informations.

www.crpgl.lu

Benjamin KLAMEREK
Patrik HITZELBERGER
Fernand FELTZ

1_(en anglais : Programmable Logic Controller (PLC), en allemand : Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)). Parfois, des PC industriels dédiés sont utilisés comme équivalent. Nous utilisons le terme PLC dans la suite de l'article, car l'abréviation API en informatique se confond facilement avec le terme Application Programming Interface.

2_ Le projet IPROME du Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann est cofinancé par le Fonds européen de développement régional (FEDER).

Increasing amounts of traffic, congestion, pollution and changes in the climate are reasons for a growing need for advanced real-time traffic and transport related information systems and services. Safety and mobility can, however, be jeopardized by poor highway design and construction or by operating procedures which allow unsafe driving conditions e.g. construction work zones, incident management or response to emergencies caused by adverse weather or by delays and perturbations occurring in the transport networks. CARLINK (Wireless Platform for Linking Cars) has developed an intelligent wireless traffic service platform between cars supported with wireless transceivers beside the road(s). The main applications in the three participating countries (Finland, Luxembourg and Spain) are real-time local road weather with accident warning services, urban transport traffic management, and multi modal transport.



THE BIOLUX NETWORK - CONNECTING RESEARCHERS_

The idea to establish the BioLux Network evolved during the networking meeting for the AFR (Aides à la Formation-Recherche) beneficiaries organized by the FNR (Fonds National de la Recherche) in December 2009. One month later, Julia Kessler and Nancy Gerloff, both PhD students at the Centre de Recherche Public-Santé (CRP-Santé) founded the BioLux Network in cooperation with the FNR. The main objective of the newly founded Network is to serve as a platform for PhD students (doctoral candidates) and Postdocs (young researchers with recent PhD degree) to facilitate scientific exchange through enhanced communication between the different research institutions of the Life Sciences domain in Luxembourg. Contacts between younger and senior researchers should also be improved. The success of the Network is evident by more than 40 participants from various research institutions throughout Luxembourg.

The regular BioLux Network meetings (every last Thursday of the month at 6.30 pm) have so far been organized at different locations including the CRP-Santé in Luxembourg (www.crp-sante.lu), CRP Henri Tudor in Esch-sur-Alzette (www.tudor.lu) and the University of Luxembourg (www.uni.lu). Topics of the past reunions were not only focused on research, but dealt also with career development in different scientific fields. With great interest the Networkers interviewed guests from pharmaceutical companies, public administrations, and senior researchers to learn more about possible career opportunities following their doctoral studies.

The 4th BioLux Network meeting took place at the University of Luxembourg with Prof. Rudi Balling, the Director of the Luxembourg Centre for Systems Biomedicine (www.lcsb.lu), Dr. Jean-Claude Schmit (Chief Executive Officer) and Daniel Cardao (Administrative and Financial Manager),

both from the CRP-Santé. The objective of the active round-table discussion was "The bottlenecks of your PhD in Luxembourg". The guest speakers and the BioLux Networkers discussed possibilities to further enhance communication within the institutions as well as between them, especially at the different CRP's and the University of Luxembourg. As an example, the initiation of national annual meetings was suggested and will be elaborated in the future.

information biolux.networking@gmail.com

Julia Kessler & Nancy Gerloff

www.revue-technique.lu

REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

**REVUE TECHNIQUE
LUXEMBOURGEOISE**
REVUE TRIMESTRIELLE DE L'ASSOCIATION DES INGÉNIEURS, ARCHITECTES ET INDUSTRIELS 3/2009

**REVUE TECHNIQUE
LUXEMBOURGEOISE**
REVUE TRIMESTRIELLE DE L'ASSOCIATION DES INGÉNIEURS, ARCHITECTES ET INDUSTRIELS 4/2009

**REVUE TECHNIQUE
LUXEMBOURGEOISE**
REVUE TRIMESTRIELLE DE L'ASSOCIATION DES INGÉNIEURS, ARCHITECTES ET INDUSTRIELS 1/2010

**REVUE TECHNIQUE
LUXEMBOURGEOISE**
REVUE TRIMESTRIELLE DE L'ASSOCIATION DES INGÉNIEURS, ARCHITECTES ET INDUSTRIELS 2/2010



Pour plus d'actualités et informations

**VISITEZ LA REVUE
SUR INTERNET**

www.revue-technique.lu

publications d'articles
annonces publicitaires
abonnements
informations
partenariats
revue@aliai.lu



Research Opportunities in Luxembourg. See what's behind it.



CORE

EXCELLENCE PROGRAMME IN RESEARCH TO MEET
LUXEMBOURG'S FUTURE SOCIO-ECONOMIC CHALLENGES

Shaping Luxembourg's national research priorities is a main activity for the National Research Fund (FNR). The CORE programme is the result of a widely consultative exercise identifying Luxembourg's future socio-economic challenges. CORE's prime objective is thus to foster scientific quality of public research by funding projects in the following domains: Innovation in Services, Intelligent Materials and Surfaces, Biomedical Science, Sustainable Resource Management, Identities, Diversity and Integration or Labour Market, Educational Requirements and Social Protection.



INTER

PROMOTION OF INTERNATIONAL COOPERATION

Increasing the visibility and competitiveness of Luxembourg research in other countries is a core objective for the National Research Fund (FNR). The INTER programme aims at promoting and facilitating international scientific collaboration, creating synergies between research centres within and outside Luxembourg and achieving critical mass. In a more globalised world, INTER helps to find solutions for environmental, socio-economic and public-health issues that transcend national borders.



PEARL

LUXEMBOURG'S RESEARCH PROGRAMME FOR
INTERNATIONALLY RECOGNISED SENIOR RESEARCHERS

Heightening Luxembourg's competitiveness as a considerable research location is crucial to the National Research Fund's (FNR) funding policy. With PEARL, the FNR offers institutions a flexible and highly attractive tool to attract established and internationally acknowledged senior researchers in strategically important research domains. The recruitment of excellent PEARL grantees contributes to increasing the quality of Luxembourg's research environment through creating a kernel for building critical mass.



ATTRACT

LUXEMBOURG'S RESEARCH PROGRAMME FOR OUTSTANDING
YOUNG RESEARCHERS FROM ALL OVER THE WORLD

Attracting excellent young R&D actors to Luxembourg is a strategically important objective of the National Research Fund (FNR). The ATTRACT programme helps outstanding researchers from all over the world to set up an independent research team within a public-sector research institution in Luxembourg. Innovation, dynamism and creativity of the submitted project as well as its high scientific quality should enhance Luxembourg's position in the international world of R&D.



AFR

AIDES À LA FORMATION-RECHERCHE

LUXEMBOURG'S GRANT SCHEME FOR PHDS AND POST DOCS

Supporting researchers in their doctoral and postdoctoral training in Luxembourg and abroad is of central interest for the National Research Fund (FNR). Through the AFR Funding Scheme (Aides à la Formation-Recherche), the FNR contributes to the improvement of the researchers' training conditions and enhances their career development. The AFR scheme promotes work contracts between AFR beneficiaries and their host institutions (public and private sector) as well as public-private partnerships. 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.



AM

ACCOMPANYING MEASURES

SUPPORT AND PROMOTION OF RESEARCH-RELATED ACTIVITIES

Strengthening the general conditions for scientific research in Luxembourg is a major strategic objective for the National Research Fund (FNR). The Accompanying Measures (AM) support the promotion of scientific culture as well as training and mobility of researchers on an international and national level. They co-finance the organisation of scientific conferences held in Luxembourg and fund scientific publications as well as national research coordination initiatives or international collaborations. Several AM actions are designed for a larger public, aiming to consolidate the link between R&D players or institutions and Luxembourg's citizens.

More information about the funding opportunities offered by the National Research Fund Luxembourg can be found on the FNR's websites.
Go and see what's behind on www.fnr.lu and www.afr.lu



Fonds National de la
Recherche Luxembourg

INVESTIGATING FUTURE CHALLENGES