

## Messung typischer „Fußabdrücke“ der Betriebslasten an Windenergieanlagen mittels Lastmonitoring : Ergebnisse aus dem JOULE - Forschungsprojekt

Measuring Footprints of Wind Turbines Fatigue Loads Using Monitoring Methods: Results of the JOULE Project

Söker, Holger; DEWI

### Summary

*In the described research project the fatigue monitoring technique is applied on three 500kW wind turbines of the same type operating under different external conditions i.e. stand alone, wind farm and complex terrain conditions. Respective sites have been selected in Germany (stand alone and wind farm) and in Greece (complex terrain). During the measurement campaigns three new data bases have been created holding on-line monitoring data sets and time series data of the wind turbines' key loads. As a fourth data source time series measurements from the wind farm at Alsvik, Sweden, have been used for the project work.*

*The central aspect of the work has been to establish "footprints" of the measured load quantities for varying external conditions and to develop and accumulate skills and experience in reading the load information stored in such fatigue load "footprints". The term "footprint" refers to the rainfall cycle frequency spectra of the observed load quantity recorded during a representative time interval together with a set of parameters describing the external and operational conditions during that time interval. In fatigue monitoring the rainfall counting data reduction technique is applied to the measured load samples on-line, reducing hardware memory and off-line evaluation demands. It has been attempted to introduce a framework of few statistic parameters that describe the fatigue load footprint and also relate to external physical conditions (s.a. average wind speed, turbulence etc.). In addition to the traditional formulations of statistic parameters in terms of time series statistics, special parameters adapted to on-line rainfall counted data sets have been examined.*

*On-line fatigue footprint monitoring has so far been applied as a diagnostic tool. In the project the development of a scheme has been started that shall enable to normalise the footprinting results and furthermore to extrapolate them to external conditions other than those present during the measurement campaign.*

*A second focus of the work has been to incorporate the findings into an refined monitoring method and to exploit this method for assessment of wind turbine fatigue in wind farm and complex terrain operation.*

### 1. Einleitung

Die Größe moderner Windenergieanlagen (WEA) hat in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen. Dabei sind Schlüsselkomponenten und –technologien der Windenergie-technik starken Veränderungen unterworfen. Gleichzeitig müssen heutzutage immer mehr WEA einer Serie verkauft und aufgestellt werden, um am Markt bestehen zu können. Diese Anlagen werden typischerweise in Windparks und zunehmend auch an entlegenen und topographisch gegliederten Standorten installiert. Die Windverhältnisse an diesen Standorten führen jedoch zu höheren Belastungen der WEA. In Folge dieser Entwicklungen kommt der Verifizierung der WEA Konstruktionen hinsichtlich Sicherheit und Betriebsfestigkeit verstärkte Bedeutung zu. Dies gilt im besonderen Maße, da die noch relativ junge Windenergieindustrie bereits heute zur Globalisierung gezwungen ist und das finanzielle Risiko der Hersteller / Windenergieplaner im Rahmen der Gewährleistung für gelieferte Anlagen und der Gewährleistung der kontraktierten Energieproduktion mit der Entfernung vom Produktionsstandort wächst. Vor diesem Hintergrund kommt der Vermessung der Betriebslasten an WEA mittels einfacher, kostengünstiger Meßmethoden und –systeme zum Zwecke der Verifizierung der Lastannahmen wachsende Bedeutung zu.

Das hier vorgestellte Joule-Projekt "FOOTPRINTS" trägt dieser Situation Rechnung, in dem es die Methode des Lastmonitoring mittels kleiner, selbständiger, vor Ort arbeitender Micromeßsysteme verfeinert und die Aussagekraft der Meßergebnisse zu verbessern sucht. Das Bild des "Fußabdrucks"

steht hier für das Prinzip des Fährtenlesens. Diesem Bild entsprechend, können durch Lastmonitoring Fußabdrücke der Betriebsbelastungen einer Windenergieanlage (WEA) in Form von Häufigkeitsverteilungen gemessener Belastungszyklen beobachtet werden. Ziel der Forschungsarbeit war es, Fähigkeiten zu entwickeln und Erfahrungen zu sammeln, die es ermöglichen, die in den meßbaren Fußabdrücken der WEA - Betriebsbelastungen enthaltenen Informationen zu entschlüsseln und zu nutzen. Das im Sommer 1996 begonnene Projekt ist in Zusammenarbeit mit dem Center of Renewable Energy Sources (CRES, Griechenland) und der FFA (The Aeronautical Research Institut of Sweden) durchgeführt und im Juni 1998 abgeschlossen worden. Die vorgestellte Arbeit wurde von der Europäischen Kommission, DGXII Non Nuclear Energy Programme unter Vertragsnummer JOR3-CT96-0103 gefördert.

## 2. Wissenschaftlicher Ansatz

### 2.1 Der Fußabdruck

Der Fußabdruck der Betriebslasten einer WEA beschreibt die Betriebsbelastung mittels der statistischen Methode des zweiparametrischen Rainflow-Zählverfahrens [1], wie es in der Betriebsfestigkeitsanalyse häufig eingesetzt wird. Die Rainflow-Zählung liefert Information über die Häufigkeit, den Mittelwert und die Schwingweite der in der Betriebsbelastungszeitfunktion enthaltenen Lastzyklen. Sie liegt als Klassenübergangshäufigkeitsverteilung in Form einer (Von-Nach) Matrix vor (Abb. 1). Es wird davon ausgegangen, daß der Fußabdruck über einen repräsentativen Zeitraum gewonnen wird, in dem sich die WEA im automatischen Produktionsbetrieb befindet. Seine charakterische Ausprägung, wie sie durch spezielle der Rainflow-Zählmethode angepaßte Parameter beschrieben werden kann, ist mit den externen und operationellen Parametern des WEA Betriebs wie Windgeschwindigkeitsmittelwert, Turbulenz, Windrichtung, Schräganströmung, Regelungsverfahren und Betriebszustand verknüpft.

### 2.2 Die Matrixparameter

Als statistische Parameter zur Beschreibung der Form und Qualität der Rainflow (RF) -Matrizen wurden die folgenden Parameter etabliert:

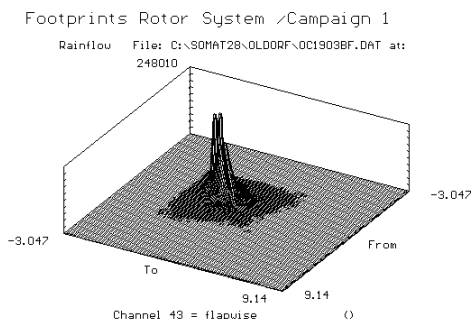


Abb. 1: Kumulierter Belastungsfußabdruck des Schlagbiegemoments am Blatt der WEA in Oldorf

Fig. 1: Cumulative fatigue load footprint of the flapwise blade root bending moment – of a wind turbine in Oldorf

- Matrixmittelwert MMW ist gleichbedeutend mit der Lage des Schwerpunkts des Häufigkeitsgebirges auf der Hauptdiagonalen der RF Matrix.
- Matrixstandardabweichung MSTD beschreibt die Streuung der Lastübergänge in der RF Matrix.
- Matrixirregularität IR ist ein Maß für die Konzentration der Lastschwingspiele um den Matrixmittelwert: Viele Lastschwingspiele verschiedener Schwingweite um den Matrixmittelwert führen zu einem Irregularitätswert nahe 1. Umgekehrt führt die Streuung der Schwingspiele über einen weiten Bereich von Mittelwerten zu einer Irregularität nahe 0.
- Matrixspitzenwert PEAK ist der Maximalwert der untersuchten Beanspruchungszeitfunktion.
- Matrixänderungsparameter MCP [2]: reagiert sensibel auf Veränderungen in der charakteristischen Form der RF Matrix.

Die Schädigungsintensität eines Fußabdrucks wurde mittels der äquivalenten 1Hz-Last bewertet. Sie bezeichnet die Schwingweite einer sinusförmigen Wechsellast, die mit der Frequenz von einem Herz über die Meßdauer auf das betrachtete Bauteil wirkend die gleiche Schädigung im Material hervorriefe wie das Kollektiv der rainflowgezählten Lastwechsel. Dabei bleibt der Mittelwert der Schwingspiele unberücksichtigt.

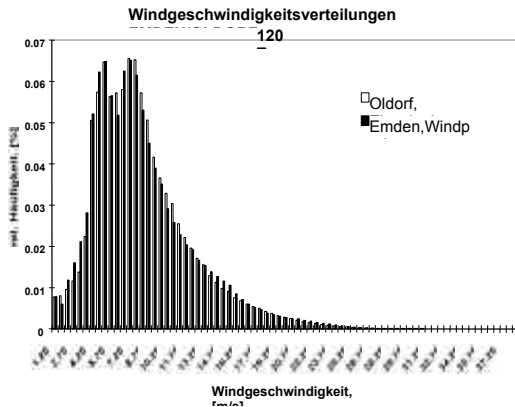


Abb. 2: Windverteilungen der Meßstandorte Oldorf und Emden

Fig. 2: Wind speed distributions Oldorf and Emden

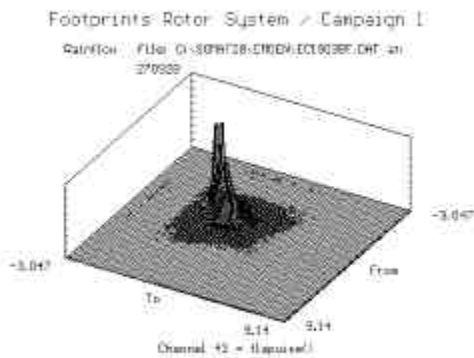


Abb. 3: Kumulierter Belastungsfußabdruck des Schlagbiegemoments am Blatt der WEA in Emden

Fig. 3: Cumulative fatigue load footprint of the flapwise blade root bending moment – wind farm operation Emden

tungsfußabdrücke für die vermessenen WEA (Windpark- und Einzelaufstellung) gespeichert worden. Für jeden dieser Tagesdatensätze wurden zunächst die spezifischen Matrixparameter bestimmt. Die Tagesdatensätze wurden dann in einem Gesamtfußabdruck kumuliert, dessen Parameter ebenfalls täglich berechnet wurden.

#### 4. Ausgewählte Ergebnisse

Die im folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die vom DEWI in Emden und Oldorf durchgeführten Lastmonitoringkampagnen.

##### 4.1 Gemessene Fußabdrücke und externe Bedingungen

Die Monitoringkampagnen in Oldorf und Emden wurden von September '97 bis März '98 durchgeführt. Mittels der beschriebenen Methodik wurden kumulative Fußabdrücke der Betriebslasten und der externen Bedingungen für einen Zeitraum von 120 Tagen ermittelt. Wie Abb. 2 zeigt, hat sich die

#### 2.3 Ziel der Untersuchungen

Das Ziel der Untersuchungen bestand darin, die Fragen zu beantworten, ob die genannten RF Matrixparameter eine aussagekräftige Beschreibung des Fußabdruckes zulassen und wie sie von den externen Parametern abhängen. In einem weiteren Schritt war dieses Wissen zur Beurteilung der Vollständigkeit und Gültigkeit der Betriebsbelastungsannahmen heranzuziehen. Ferner sollte untersucht werden inwieweit die etablierten Parameter dazu benutzt werden können, die gemessenen Betriebsbelastungskollektive zu normalisieren bzw. zu skalieren um eine Übertragbarkeit eines gemessenen Fußabdrucks auf veränderte externe Bedingungen zu erreichen.

#### 3. Technische Vorgehensweise

Die Methode des Lastmonitoring mittels kleiner, selbständiger, vor Ort arbeitender Micromeßsysteme ist bereits von früheren Projekten bekannt [3]. In dieser Meßkampagne ist die Methode des Lastmonitoring von den drei Projektpartnern an drei 500 kW WEA gleichen Typs in unterschiedlichen Betriebssituationen eingesetzt worden. Eine der Maschinen wird im komplexen Gelände der Insel Kreta betrieben, eine im Windpark der Stadtwerke Emden und eine als Einzelanlage im friesischen Oldorf. Fußabdrücke ausgewählter Betriebslasten in Form von Häufigkeitsverteilungen rainflow-gezählter Betriebslastzyklen wurden für die drei Maschinen ermittelt. Parallel zu den aktuellen Messungen synthetisierten die schwedischen Partner Betriebsbelastungsfußabdrücke aus Zeitreihenmessungen ihrer Datenbasis der Alsvik - Windfarm auf Gotland. Die Datenbasen, die sowohl online gezählte Rainflowkollektive als auch Zeitreihenmessungen beinhalten, wurden mittels Parameteridentifikationstechniken ausgewertet.

Im Rahmen der vom DEWI durchgeführten Meßkampagne sind tägliche Betriebsbelas-

Annahme bestätigt, daß die Windverteilungen an den zwei etwa 70 km auseinander liegenden Standorte nahezu identisch sind.

Beide vermessenen WEA wiesen eine Netzkopplungsdauer von 91% des Kumulationszeitraums sowie eine Schräganströmungsdauer von weniger als 2% auf. Obwohl die Anlage in Emden in einem Windpark installiert ist und zu etwa 46% der Kumulationszeit der Nachlaufströmung einer vorgelagerten WEA ausgesetzt war, unterscheiden sich die Belastungsfußabdrücke nur geringfügig (Abb. 1 und 3). Dies wird insbesondere bei Betrachtung der abgeleiteten Schwingweitenkollektive und der zugehörigen äquivalenten Lasten (Abb. 4) deutlich. Die Turbulenzmessung mittels des Gondelanemometers beider WEA lieferte für beide Standorte nahezu identische Werte um 11%. Dieses Ergebnis legt den Schluß nahe, daß in dem vorliegenden Fall die Windparksituation in einer ansonsten wenig turbulenten Anströmung eine annähernd gleiche Betriebsbelastung hervorruft wie der Betrieb der WEA in Einzelaufstellung mit höherer turbulenter Anströmung.

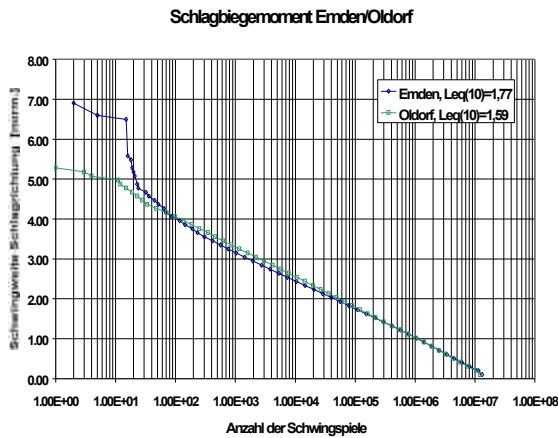


Abb. 4 Schwingweitenkollektive der Schlagbiegemomente an den Blättern der WEA in Oldorf / Emden

Fig. 4: Cumulative fatigue load footprint of the flapwise blade root bending moment – wind turbine operation in Oldorf/Emden

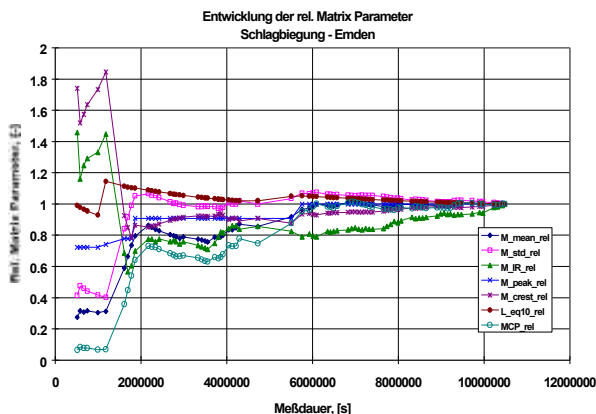


Abb. 5: Entwicklung der relativen RF Matrixparameter

Fig. 5: Development of the relative RF matrix parameter

len eine spezifische Standardabweichung bestimmt, die dann wiederum benutzt wird, um die Schwingweiten der Lastzyklen des betrachteten Schnitts zu normalisieren. Abb. 5 zeigt die Anwendung der Methodik auf zwei Tages-RF-Matrizen die für unterschiedliche Turbulenzbedingungen ermittelt wurden.

#### 4.2 Bewertung der Gültigkeit der gemessenen Belastungsfußabdrücke

Die Gültigkeit der kumulierten Fußabdrücke wurde mittels der Entwicklung der Matrixparameter über die Dauer der Meßkampagne bewertet.

Abb. 5 zeigt, daß sich die Parameter im Laufe der Zeit stabilisieren und nach etwa 2 Monaten nur noch geringe Veränderungen zeigen. Dann fällt die Veränderungsrate des Matrixänderungsparameters (von Kumulationsschritt n Tage nach n+1 Tage) auf einen Wert unter 2%. Wird gleichzeitig eine für den Standort typische Windgeschwindigkeitsverteilung erreicht, sind notwendiges (Windverteilung) und hinreichendes (RF Matrixparameter) Kriterium für die Gültigkeit des Belastungsfußabdrucks erfüllt.

#### 4.3 Parameteridentifikation

Mittels linearer Multiparameter-Regressionsanalyse [4] wurden die Abhängigkeiten des Matrixänderungsparameters und der äquivalenten 1 Hz-Last von den zuvor etablierten Matrixparametern untersucht. Dabei zeigen sich klare Abhängigkeiten der Schädigungsintensität eines Belastungsfußabdrucks von den definierten Matrixparametern, wie in Abb. 6 exemplarisch dargestellt. Für die Matrixparameter MMW, MSTD und PEAK konnten deutliche Korrelationen zu den externen Parametern Windgeschwindigkeit, Turbulenz und maximale Windgeschwindigkeit nachgewiesen werden.

#### 4.4 Normalisierung von Betriebsbelastungsfußabdrücken

Basierend auf der Arbeit von Bergström [5] zur Normalisierung rainflowgezahlter Schwingweitenkollektive der Windgeschwindigkeit wurde vom DEWI ein Verfahren zur Normalisierung online gezählter Belastungsfußabdrücke vorgeschlagen. Dabei wird für jeden Schnitt der RF Belastungsmatrix senkrecht zur Hauptdiagona-

### 5. Fazit

Die vorgestellte Forschungsarbeit ermöglicht durch die Einführung aussagekräftiger Parameter zur Beschreibung und Bewertung gemessener Betriebsbelastungskollektive – Fußabdrücke – ein verbessertes Lastmonitoring. Insbesondere wird durch die Möglichkeit die Parameterentwicklung zu verfolgen das Vertrauen in die Zuverlässigkeit der Meßaussage gestärkt. Darüberhinaus konnte ein Verfahren zur Normalisierung vorgeschlagen werden, welches in zukünftiger Entwicklungsarbeit verifiziert werden sollte.

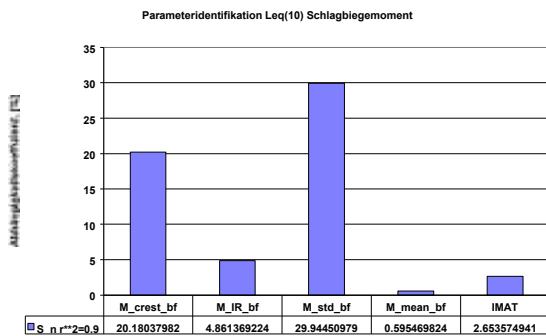


Abb. 6: Parameteridentifikation für das Schlagbiegemoment: Abhängigkeit der equivalente Last von den RF Matrixparametern

Fig. 6: Parameter identification for the flapwise bending moment: Dependence coefficients for the equivalent load vs. RF matrix parameter

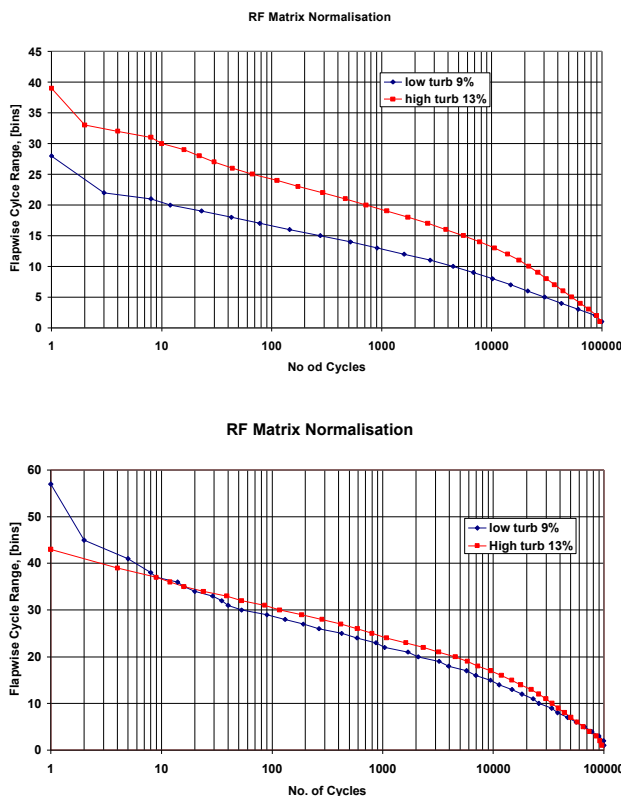


Abb. 7: Normalisierung Schlagbiegungsschwingweitenkollektive für zwei Turbulenzgrade

Fig. 7: Normalisation of flapwise load range spectrum for two turbulence intensities

### 6. Zusammenfassung

Das Bild des Fußabdrucks steht für das Prinzip des Fährtenlesens. Diesem Bild entsprechend, können durch Lastmonitoring Fußabdrücke der Betriebsbelastungen einer Windenergieanlage (WEA) in Form von Häufigkeitsverteilungen gemessener Belastungszyklen beobachtet werden. Ziel des vom DEWI koordinierten Joule-Projekts "FOOTPRINTS" war es, Fähigkeiten zu entwickeln und Erfahrungen zu sammeln, die es ermöglichen, die in den meßbaren Fußabdrücken der WEA - Betriebsbelastungen enthaltenen Informationen zu entschlüsseln und zu nutzen. In einer Meßkampagne ist die Methode des Lastmonitoring von den drei Projektpartnern CRES (Griechenland), FFA (Schweden) und DEWI verfeinert und an drei 500 kW WEA gleichen Typs in unterschiedlichen Betriebssituationen (Einzel- und Windparkbetrieb sowie Betrieb in komplexem Gelände) eingesetzt worden. Auswertungen der Datenbasen mittels Parameteridentifikationstechniken haben Aufschluß über diejenigen Parameter gegeben, die für die Form und Schädigungsintensität der Belastungshäufigkeitsverteilungen relevant sind. Neben den traditionellen Formulierungen dieser Parameter als statistische Kennwerte von 10-Minuten-Zeitreihen wurden spezielle, der Rainflow-Zählmethode angepaßte Parameter hinsichtlich ihrer Aussagekraft untersucht. Der Kern der Forschungsarbeit war es, die Art und den Grad des Einflusses dieser Parameter abzuschätzen und dieses Wissen zur Beurteilung der Vollständigkeit und Gültigkeit der Betriebsbelastungsannahmen heranzuziehen. Ferner wurde untersucht inwieweit diese Parameter dazu benutzt werden können, die gemessenen Betriebsbelastungskollektive zu normalisieren.

## 7. Literatur

- [1] Matsuiski, M.; Endo, T.: *Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress* : paper presented at the Kyushu district meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers, March 1968.
- [2] Reinke, Wilhelm: *Ein Beitrag zur Extrapolation von Wechselbelastungen aus zweiparametrischen Zählverfahren*. - Düsseldorf: VDI-Verl., 1988. - (VDI Fortschrittsberichte ; 5, 151)
- [3] *Monitoring Fatigue Loads on Wind Turbines Using Cycle Counting Data Acquisition Systems* : final report for the Commission of the European Union, Directorate General XII for Science, Research and Development / Söker, Holger [ed.] ; Deutsches Windenergie-Institut <Wilhelmshaven> ; Flygtekniska Forsöksanstalten <Bromma> ; Centre for Renewable Energy Sources <Pikermi>. - Wilhelmshaven: DEWI, 1995. - (JOU-CT92-0175)
- [4] Söker, H.; Morfiadakis, E.; Kossivas, T.; Östman, A.: *Footprinting Wind Turbine fatigue Loads* : In: Rick Watson (Editor): *European Wind Energy Conference Proceedings of the International Conference held at Dublin Castle, Ireland, October 1997*. Slane, County Meath: IWEA, 1998.
- [5] Bergström, H.; Ganander, H.; Johannson, H.: *Wind Description for Designing Weecs, Based on RFC Evaluated Wind Measurements* . In: *Wind energy : technology and implementation ; proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC '91, Amsterdam, The Netherlands, October 14-18, 1991*. Amsterdam [u.a.]: Elsevier, 1991. - S. 762-766