

## **Analyse und Simulation von Abflußzeitreihen der Elbe**

Martin Helms, Stefan Belz, Jürgen Ihringer

### **1. Einleitung und Zielsetzung**

Wesentliche Elemente im landschaftsökologischen Wirkungsgefüge des Flußsystems der Elbe stellen der Feststoffhaushalt der Elbe und die Morphodynamik ihres Gerinnebetts, der Wasser- und Stoffhaushalt im Auenbereich und die Auenökologie dar. Diese werden entscheidend von den Abflußverhältnissen in der Elbe und der daraus resultierenden Dynamik der Wasserstände beeinflusst. Im Rahmen des Verbundprojekts 'Morphodynamik der Elbe' werden daher hydrologische Datenerhebungen und Untersuchungen durchgeführt. Ziel ist die Beschreibung und das bessere Verständnis des Abflußgeschehens im Elbe-Einzugsgebiet in seinem mittleren Verhalten, in seiner Variabilität und in seiner zeitlichen Entwicklung.

Die Untersuchungen umfassen eine statistische Analyse von Abflußzeitreihen an Elbe-Pegeln, deren Ergebnisse (Kennwerte der Abflußdynamik) in Form von hydrologischen Längsschnitten der Elbe regionalisiert werden, um Informationen über die Abflußdynamik auch an Stellen ohne Abflußmessungen zu gewinnen.

Nicht nur Kennwerte, sondern auch zeitliche Abfolgen der Abflußwerte sind für Prozesse im Flußsystem entscheidend. Hierzu kommen Methoden der stochastischen Hydrologie zur Anwendung. Neben der Spektralanalyse wird ein Modell zur Simulation von Reihen mittlerer täglicher Abflüsse angewandt und weiterentwickelt. Über die Beschreibung des Abflußprozesses als Randbedingung für Prozesse im Flußsystem der Elbe und über die Einschätzung der Repräsentativität der verfügbaren Abflußmeßreihen hinaus sollen die Untersuchungen zu einem verbesserten Verständnis der hydrologischen Prozesse im Einzugsgebiet der Elbe führen. Damit soll einen Beitrag zu der in der aktuellen Forschung anvisierten Kopplung zwischen hydrologischen Modellen makroskaliger Einzugsgebiete und Klimamodellen geliefert werden. Diese ist notwendig zur Abschätzung der Wirkungen von Klimaänderungsszenarien auf den Abflußprozeß.

### **2. Datengrundlage**

Im Rahmen des Verbundprojekts 'Morphodynamik der Elbe' wurde aus verschiedenen Quellen ein umfangreicher Datenbestand zusammengestellt. Dieser umfaßt neben den im folgenden Abschnitt näher behandelten Wasserstands- und Abflußzeitreihen die Reihen verschiedener klimatologischer Parameter (insbesondere Reihen täglicher Niederschlagshöhen von 1425 Meßstationen im deutschen Bereich und 23 Meßstationen im tschechischen Bereich) und verschiedene thematische Datensätze, die für die Entwicklung des Simulationsmodells und für die Regionalisierung von Bedeutung sind.

## 2.1. Abfluß- und Wasserstandszeitreihen und Untersuchung ihrer Konsistenz

Es wurden für verschiedene Pegel der Elbe und ihrer wichtigsten Nebenflüsse im deutschen Bereich, sowie für den grenznahen Pegel Decin im tschechischen Bereich von verschiedenen Ämtern Abfluß- (Q) und Wasserstandsreihen (W) mit mittleren Tageswerten und Monatsextrema (Terminwerte) beschafft. Die verfügbaren Reihen für deutsche Elbe-Pegel sind die der Pegel Dresden ( W: 1853-1996 / Q: 1851-1997), Torgau ( W: 1936-1996 / Q: 1936-1997), Wittenberg ( W: 1937-1996 / Q: 1951-1997), Aken ( W: 1926-1996 / Q: 1936-1997), Barby ( W: 1900-1995 / Q: 1900-1997), Magedburg ( W: 1931-1995 / Q: 1931-1997), Tangermünde ( W: 1964-1995 / Q: 1961-1997), Wittenberge ( W: 1896-1995 / Q: 1900-1997) und Neu Darchau ( W: 1971-1996 / Q: 1875-1997).

Um Effekte von Inkonsistenzen so weit wie möglich zu vermeiden, wurden die Reihen einer kritischen Prüfung unterzogen, um Aufschluß über folgende Effekte zu gewinnen.

- *Fehlerhafte Abflußkurven:* Die W-Q-Beziehungen der Elbe haben sich mit der Zeit deutlich geändert. Häufig ist dies nicht rechtzeitig durch aktualisierte Abflußkurven berücksichtigt worden, so daß die Verwendung einer Abflußkurve über ihren Gültigkeitsbereich hinaus zu Bilanzunstimmigkeiten geführt hat. Hinzu kommen in einigen Fällen offenbar fehlerhafte Abflußkurven. Auch wenn die Fehler nicht restlos korrigiert werden können, ist die Kenntnis der resultierenden Unsicherheiten wichtig.
- *Fehlerhafte Einzelpunkte:* Sie beruhen auf Ablesefehlern, Schreibfehlern etc.
- *Eisstaueffekte:* Solche Ganglinienabschnitte sind für nachfolgende Untersuchungen auszusondern, da sie nicht die Prozesse im Einzugsgebiet repräsentieren.

Zur Identifizierung dieser Effekte, wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- *Untersuchung von Diagrammen mit gegeneinander aufgetragenen Wertepaaren sich entsprechender Wasserstands- und Abflußwerte:* Zeitabschnitte der Verwendung verschiedener Abflußkurven konnten identifiziert und W-Q-Beziehungen rekonstruiert werden; Zeitpunkte fehlerhafter Einzelpunkte und Zeitabschnitte vermutlicher Eisstaueffekte konnten identifiziert werden.
- *Längsschnittbetrachtungen für benachbarte Pegelgruppen:* Ganglinien wurden visuell untersucht und über verschiedene Zeitabschnitte (mittlere jährliche Abflüsse, Füllen von Abflußereignissen) bilanziert.
- In Zeitabschnitten mit vermutlich fehlerhaften Abflußkurven wurden ab dem Jahr 1961 mit Hilfe der Wasserstandsreihen und der jeweils zeitlich benachbarten W-Q-Beziehung *neue Abflußganglinien generiert*, die dann einer erneuten Längsschnittbetrachtung unterzogen wurden. Teilweise war es möglich plausible Abflußganglinien zu erzeugen. In diesem Fall wurden sie für nachfolgende Untersuchungen verwendet.
- Informationsaustausch mit zuständigen Behörden. Für den Pegel Torgau wurden die im BfG-Bericht 1041 (Glugla, G. et al. 1996) für Abflußkurven in Jahresscheiben von 1971 bis 1993 angegebenen Beziehungen verwendet.

Einen Eindruck von der Problematik erlauben die Abbildungen 1 und 2 für den Pegel Aken. In Abbildung 1 ist die Variabilität der mit der Zeit veränderten Abflußkurven zu erkennen, sowie die als fehlerhaft identifizierten W-Q-Beziehungen zweier Zeitabschnitte. Eine Korrektur erwies sich als plausibel. Der Effekt ist in Abbildung 2 erkenn-

bar. Die streuenden Einzelpunkte (Abbildung 1) entsprechen fehlerhaften Einzelpunkten oder Eisstauwirkungen.

Die Untersuchung des Pegels Magdeburg ergab starke Inkonsistenzen, vor allem im Hochwasserbereich. Von der Analyse dieser Abflußzeitreihe wurde daher abgesehen.

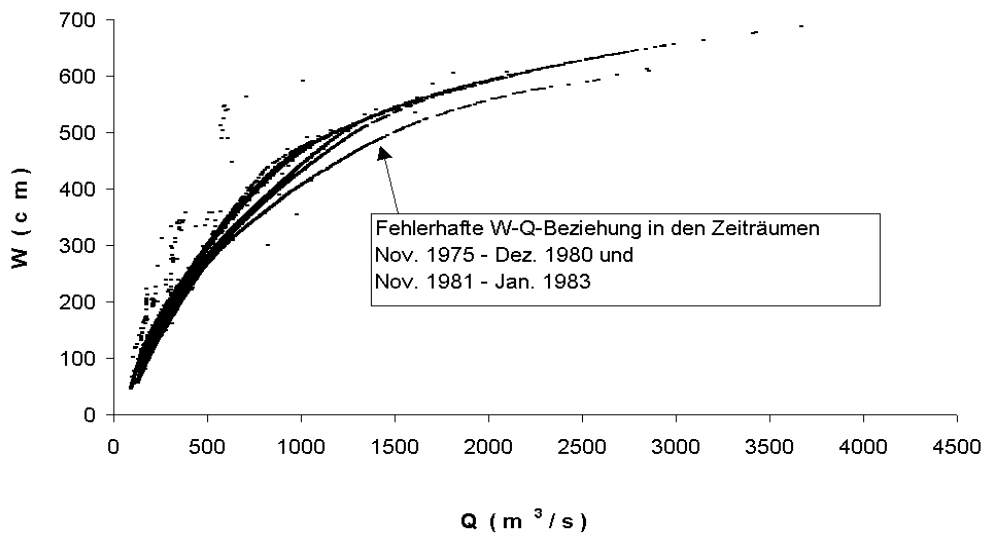


Abbildung 1: W-Q-Wertepaare (mittlere Tageswerte) des Pegels Aken 1936-1995.

### 3. Analyse von Abflußreihen und Erstellung hydrologischer Längsschnitte

In den folgenden Ausführungen wird der Schwerpunkt auf die Abflüsse im Bereich des mittleren jährlichen Abflusses und oberhalb davon gelegt, da diese für das Wirkungsgefüge im Flußsystem besondere Bedeutung haben.

Aus den gegebenen Reihen wurden folgende Parameter-Reihen abgeleitet:

- Mittlere monatliche Abflüsse (MoMQ) und mittlere jährliche Abflüsse (MQ) der Abflußjahre (1.11. bis 31.10)
- Maximale Hochwasserscheitelwerte (HQ) der Abflußjahre und der Vegetationszeiten (VHQ). Die Vegetationszeit wurde für die Zeit vom 1.4. bis 30.9. angenommen. Die Unabhängigkeit von Ereignissen aufeinanderfolgender Jahre (HQ) wurde beachtet. Bei den Vegetationszeitmaxima war es, wie in Abbildung 2, in einigen Fällen erforderlich, anstatt von Werten des Aprils zugehörige Scheitelwerte am Ende des März zu verwenden, um für verschiedene Pegel vergleichbare Datenkollektive zu erzeugen.
- Im Hinblick auf auenökologisch relevante Überflutungsdauern werden in ähnlicher Weise Reihen maximaler Abflußwerte ermittelt, die im Abflußjahr oder in der Vegetationszeit über x Tage zusammenhängend überschritten wurden (HQ(x) bzw. VHQ(x); x = 5, 10, 20, 30, 50 Tage).

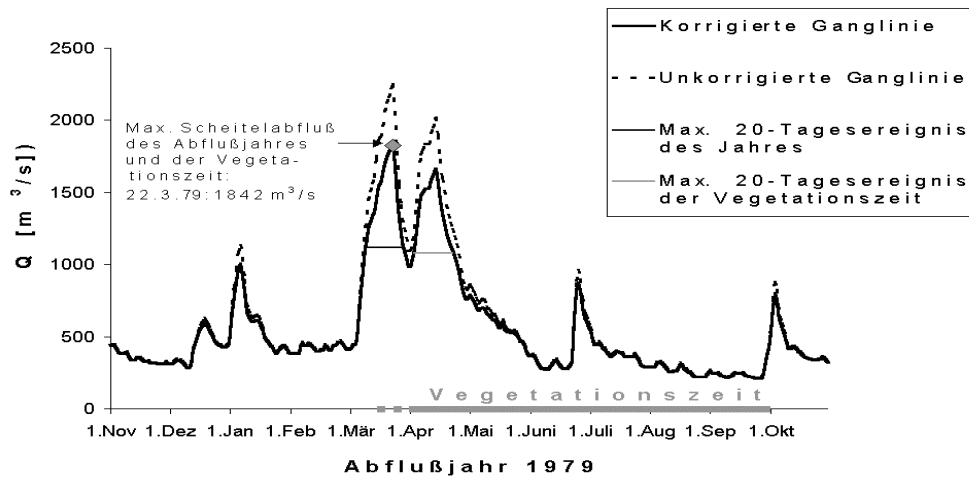


Abbildung 2: Ermittlung von Hochwasserparametern am Beispiel des Jahres 1979 am Pegel Aken

### 3.1. Stationaritätsprüfung

Als Ursache für Instationaritäten in Abflußzeitreihen der Elbe sind die Einrichtungen von Talsperren im Saale-Einzugsgebiet in den 30er/40er Jahren und im tschechischen Gebiet in den 50er/60er Jahren zu nennen (dämpfender Effekt). Desweiteren wurden in unserem Jahrhundert, vor allem in seiner zweiten Hälfte, Deichbaumaßnahmen durchgeführt, die insbesondere die Mündungsbereiche von Nebenflüssen der Elbe ab der Havelmündung abwärts betreffen (verschärfender Effekt). Zum Vergleich: Simon, M., 1996.

Instationaritäten sind für den Hochwasserbereich zu diskutieren und ggf. bei weiteren Analysen (z. B. Extremwertstatistik) zu beachten, um verzerrte Ergebnisse zu vermeiden.

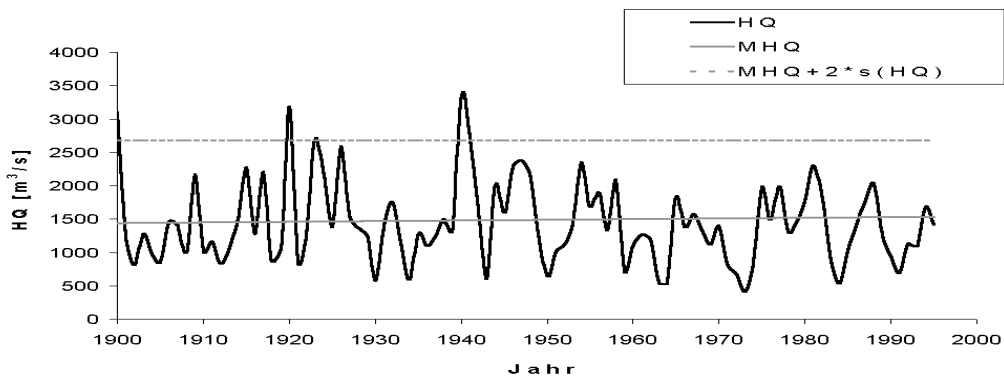
Im Jahr 1963 wurde die Talsperre von Orlik im Moldau-Einzugsgebiet mit bedeutender Speicherkapazität in Betrieb genommen. Damit waren etwa 2/3 der anthropogen geschaffenen Speicherkapazität eingerichtet. Es wird daher die Teilreihe 1964 – 1995 gesondert betrachtet. In dieser Zeit kamen weitere Anlagen hinzu. Eine weitere Aufteilung der Reihe würde jedoch zu einem zu starken Verlust an statistischer Fundierung der Analysen führen.

Die Einteilung läßt sich stützen durch Ergebnisse einer Doppelsummenanalyse. Diese indiziert einen Effekt auf Hochwasserabflüsse, jedoch ohne statistische Signifikanz.

Eine veränderte Hochwassercharakteristik ist auch in Abbildung 3 erkennbar: am Pegel Dresden überschreitet die Reihe der HQ die Referenzlinie ihrer zweifachen Standardabweichung vom Mittelwert nach oben vor Beginn der großen Speichereinrichtungen in Tschechien viermal, nach 1963 wird sie nicht annähernd erreicht. Eine Veränderung der Varianz läßt sich feststellen, jedoch ist diese nach dem Ergebnis eines F-Tests nicht signifikant.

Für die Reihen der HQ von 1900 bis 1995 der Pegel Dresden und Barby lassen sich steigende, für den Pegel Neu Darchau ein fallender Trend berechnen. Dies entspricht den Erwartungen. Die Trends sind jedoch nicht signifikant.

Insgesamt gibt es Hinweise auf Instationaritäten, die jedoch nach den genannten Methoden nicht signifikant sind. Damit sind auch Analysen längerer Reihen (ab 1900) vertretbar.



**Abbildung 3:** Reihe der jährlichen Scheitelabflüsse (HQ) 1900-1995 des Pegels Dresden gegenüber der Referenz ihrer zweifachen Standardabweichung vom arithmetischen Mittel nach oben.

### 3.2. Pegelweise statistische Analysen des Abflußprozesses

#### 3.2.1. Gewässerkundliche Hauptzahlen

Größenverhältnisse in den Abflußreihen geben die Gewässerkundlichen Hauptzahlen in Tabelle 1 für die Gesamtreihen (ab 1900) und für die Reihen 1964-1995 an.

**Tabelle 1:** Zusammenstellung Gewässerkundlicher Hauptzahlen verschiedener Pegel und Reihen, ergänzt um den kleinsten jährlichen Hochwasserscheitelabfluß MinHQ.

Pegel	Reihe	HHQ (m³/s)	MHQ (m³/s)	MinHQ (m³/s)	MQ (m³/s)	MNQ (m³/s)	NNQ (m³/s)
Dresden	1900 – 1995	3360	1439	415	327	101	22,5
Torgau	1936 – 1995	3400	1399	451	346	118	17,5
Aken	1936 – 1995	3690	1639	564	437	162	82,5
Barby	1900 – 1995	4650	2026	643	556	202	89,0
Wittenberge	1900 – 1995	3590	1910	744	672	272	120
Neu Darchau	1900 – 1995	3620	1862	788	705	268	128
Dresden	1964 – 1995	2310	1311	415	336	121	55,7
Torgau	1964 – 1995	2169	1290	451	351	130	59,9
Wittenberg	1964 – 1995	2560	1360	414	371	140	78,7
Aken	1964 – 1995	2720	1528	564	449	171	103
Barby	1964 – 1995	3282	1847	643	576	224	122
Tangermünde	1964 – 1995	3259	1741	612	587	243	151
Wittenberge	1964 – 1995	3280	1873	744	702	304	159
Neu Darchau	1964 – 1995	3574	1803	788	730	293	181

#### 3.2.2. Dauerlinien

Dauerlinien geben Aufschluß über die Variabilität des Abflußgeschehens und der damit verbundenen Prozesse. So können die Über- bzw. Unterschreitungshäufigkeiten kritischer Abflußwerte ermittelt werden, oder umgekehrt die zu bestimmten Über-/Unterschreitungshäufigkeiten gehörigen Abflußwerte (Quantile).

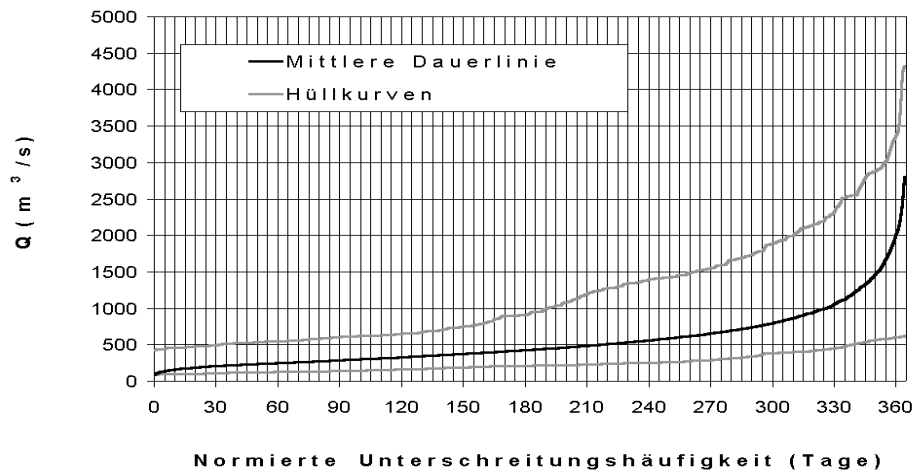
Bei der Erstellung der Dauerlinien werden die mittleren täglichen Abflußwerte eines Pegels der Größe nach sortiert und dann gegen ihre Unterschreitungshäufigkeit aufgetragen.

Einerseits werden dabei die mittleren Dauerlinien aus den jeweiligen gesamten Reihen ermittelt und, bezogen auf die auf ein Jahr normierten Unterschreitungshäufigkeiten, aufgetragen. In entsprechender Weise wird in bezug auf die Vegetationszeit vorgegangen.

Andererseits werden die Dauerlinien aller einzelnen Abflußjahre/Vegetationszeiten errechnet und hieraus die obere und untere Hüllkurve für diese Dauerlinien bestimmt. Hiermit kann ein Eindruck vom Schwankungsverhalten der Dauerlinien gewonnen werden.

Eine exemplarische Darstellung dieser Dauerlinien gibt die Abbildung 4.

Im Projekt werden aus den Dauerlinien Abflußwerte vorgegebener Häufigkeiten ( 5 , 10 , 20 , .. , 100 Tage / Dezile) bestimmt, um Rahmeninformationen über die Häufigkeitsverhältnisse im Abflußprozeß zu geben. Eine Informationsverfeinerung für konkrete Fragestellungen ist möglich.



**Abbildung 4:** Mittlere Dauerlinie des Pegels Barby für die Reihe mittlerer täglicher Abflüsse 1900-1995, sowie Hüllkurven der jahresbezogenen Dauerlinien.

### 3.2.3. Jahrgang mittlerer monatlicher Abflüsse (Abflußregime)

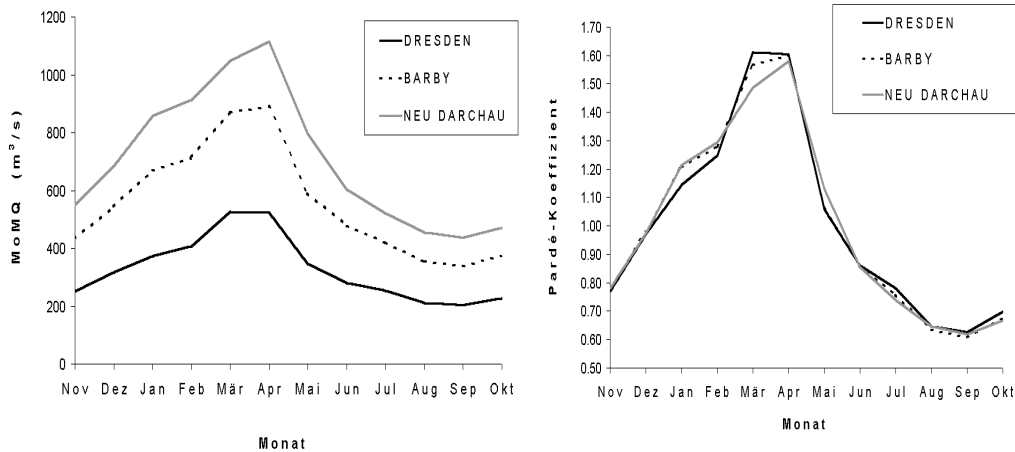
Besonders in bezug auf den Wasserhaushalt und auf die Ökologie der Auen kommt der jahreszeitlichen Entwicklung der Abflußverhältnisse große Bedeutung zu.

Aus den Reihen mittlerer monatlicher Abflußwerte MoMQ werden mittlere Jahrgänge der MoMQ ermittelt (siehe Abbildung 5). Um die Charakteristiken der Regimes untereinander besser vergleichbar zu machen, werden zudem die entsprechenden Pardé-Koeffizienten (= Mittel der MoMQ/ Mittel der MQ) dargestellt.

Typisches Kennzeichen der komplexen, pluvio-nivalen Regimes ist das durch die nivale Komponente bedingte Maximum in den Monaten März/April. Vom Pegel Dresden zum Pegel Neu Darchau verschiebt es sich offenbar zum April.

Die detailliertere Untersuchung des Regimes stellt eine interessante Perspektive dar. Hierzu könnte die Untersuchung der Jahrgänge weiterer statistischer Kennwerte der

MoMQ-Reihen (Standardabweichung, Quantile, Autokorrelationskoeffizient) beitragen, sowie eine regionale Regimetypisierung mit Hilfe der Fourier- und Periodogrammanalyse.



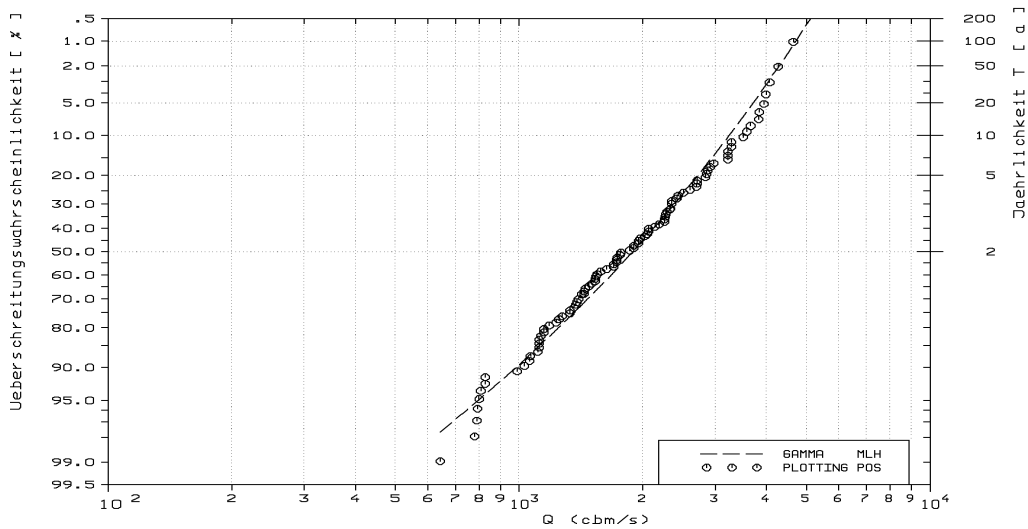
**Abbildung 5:** Mittlerer Jahresgang mittlerer monatlicher Abflüsse, sowie Jahresgang der Pardé-Koeffizienten für die Reihen 1900-1995 der Pegel Dresden, Barby und Neu Darchau.

### 3.2.4. Extremwertstatische Untersuchungen im Hochwasserbereich

Hinsichtlich der Wirkungen von Hochwasserereignissen (Erosion, Überflutungen in Auen, Hochwasserschutz) interessiert, wie häufig extreme Ereignisse auftreten.

Aus den Jahresreihen der HQ, VHQ, HQ(x) und VHQ(x) werden die Abflüsse HQT, VHQT, HQ(x)T und VHQ(x)T mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten bzw. statistischen Wiederkehrintervallen (Jährlichkeiten T, T = 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 Jahre) ihrer Überschreitung errechnet. Hierzu werden Verteilungsfunktionen herangezogen, die über die aus den Datenkollektiven zu errechnenden Momente bzw. nach der Maximum-Likelihood-Methode an die Datenkollektive angepaßt werden. Detaillierte Erläuterungen finden sich in Plate, E., 1993, S. 132 ff. Zur Auswahl der geeigneten Verteilungsfunktion werden Plots der ermittelten Verteilungsfunktion in einem Wahrscheinlichkeitsnetz zusammen mit den über empirische Wahrscheinlichkeiten ermittelten plotting positions des Datenkollektivs untersucht (zum Vgl. Abbildung 6). Die Plots geben Aufschluß über die Güte der Anpassung, v.a. auch im entscheidenden Extrembereich. In diesem Bereich ergeben sich häufig stärkere Streueffekte, die die Auswahl einer geeigneten Verteilungsfunktion bei pegelweisen Analysen erschweren, zumal Meßgenauigkeiten in diesem Bereich kritisch zu betrachten sind. Unter Berücksichtigung räumlicher Tendenzen der Hochwassercharakteristik entlang der Elbe wird daher im Rahmen der Erstellung von Längsschnitten ein räumlicher Abgleich pegelweiser Auswertungen durchgeführt.

Aus den Verteilungsfunktionen lassen sich Abflüsse der gefragten Jährlichkeit als Quantile berechnen. Die HQT der Reihen 1964-1995 und 1936-1995 (letztere entsprechen an den Pegeln mit längeren verfügbaren Reihen etwa denjenigen der Reihe 1900-1995) sind als Übersicht in der Tabelle 2 zusammengestellt.



**Abbildung 6:** Plotting positions (nach Weibull) und angepasste zweiparametrische Gamma-Verteilungsfunktion der Reihe der HQ 1900 - 1995 des Pegels Barby.

**Tabelle 2 :** Jahresscheitelabflüsse der Jährlichkeiten T (HQT) für verschiedene Pegel und Reihen. VF steht für die gewählte Verteilungsfunktion, AV für das Verfahren der Anpassung (-M: Momentenmethode, -ML: Maximum-Likelihood-Methode). Weitere Kürzel: Gb: Gumbel-VF, LN3: 3-parametrische log. Normal-VF., G2: 2-parametrische Gamma-VF., W3: Weibull-3-VF., W2: Weibull-2-VF, LW3: log. Weibull-3-VF, LW2: log. Weibull-2-VF.

Pegel	Reihe	MHQ	VF-AV	HQ2	HQ3	HQ5	HQ10	HQ20	HQ50	HQ100
Dresden	1936-1995	1426	Gb-ML	1331	1596	1891	2262	2618	3078	3423
Torgau	1936-1995	1399	LN3-ML	1285	1553	1855	2237	2607	3092	3461
Aken	1936-1995	1639	G2-M	1510	1868	2247	2711	3137	3665	4045
Barby	1936-1995	2014	LN3-M	1922	2336	2767	3269	3717	4261	4649
Wittenberge	1936-1995	1957	LN3-M	1921	2246	2570	2931	3241	3604	3853
Neu Darchau	1936-1995	1917	W3-M	1803	2147	2511	2933	3304	3743	4046
Dresden	1964-1995	1311	G2-M	1251	1470	1695	1968	2204	2497	2706
Torgau	1964-1995	1290	LW2-M	1236	1471	1715	1995	2242	2534	2738
Wittenberg	1964-1995	1360	W2-M	1316	1595	1871	2172	2424	2710	2900
Aken	1964-1995	1528	LN3-M	1502	1789	2072	2386	2653	2964	3176
Barby	1964-1995	1847	LN3-M	1816	2160	2499	2873	3191	3558	3810
Tangermünde	1964-1995	1741	LW3-M	1650	1981	2332	2748	3121	3574	3895
Wittenberge	1964-1995	1900	LW2-M	1833	2166	2505	2889	3222	3611	3879
Neu Darchau	1964-1995	1803	G2-M	1761	2088	2426	2830	3196	3641	3959

### 3.3. Erstellung hydrologischer Längsschnitte

Um Aussagen zur Abflußdynamik auch für beliebige Stellen entlang der Elbe treffen zu können, werden Längsschnitte verschiedener Abflußparameter erstellt. Zudem werden dadurch räumliche Entwicklungstendenzen des Abflußgeschehens deutlich, sowie Auswirkungen von veränderten Abflußsituationen entlang der Elbe.



Die Längsschnitte werden auf Grundlage von Regressionsbeziehungen ermittelt, in denen der zu erklärende Regressand des logarithmierten Abflußparameters an den Pegeln aus den erklärenden Regressoren der zugehörigen logarithmierten Einzugsgebietsflächen und gegebenenfalls der logarithmierten Fließlängen der Elbe berechnet wird. Die Wahl der Regressoren erfolgt nach Ermittlung des korrigierten Bestimmtheitsmaßes und nach Signifikanztests für die Regressoren. Die Einbeziehung der Fließlänge ist für Hochwasserparameter teilweise erforderlich, um Abflachungseffekte ablaufender Hochwasserwellen zu berücksichtigen. Um zu starke Streuungen bei den Regressionsanalysen, die aus den unterschiedlichen hydrologischen Charakteristika der Teileinzugsgebiete resultieren, zu vermeiden, erwies es sich als günstig, eine Zweiteilung der Elbepegel in die Pegelgruppen Dresden bis Barby und Barby bis Neu Darchau vorzunehmen. Nach diesem Konzept wurden bereits Längsschnitte der folgenden Parameter erstellt:

- MQ (siehe Abb. 7) und Dauerlinien-Dezile der Abflußjahre und Vegetationszeiten der Reihe 1964-1995 für die gesamte Elbe im deutschen Bereich bis Neu Darchau.
- MHQ, HQT, MVHQ, VHQT (T = 2,3,5,10,20,50,100 Jahre) der Reihen 1964-1995 und 1936-1995 für die gesamte Elbe im deutschen Bereich (siehe Abbildung 7).
- MHQ(x) und HQ(x)T (T = 2,3,5,10,20,50,100 Jahre / x = 10,20,30,50 Tage) der Reihen 1964-1995 und 1936-1995 für den Bereich Dresden-Barby.

Für den Pegel Wittenberg (Abflußreihe ab 1951) können die Parameter MHQ, HQT, MVHQ und VHQT für den Zeitraum 1936-1995 anhand des räumlichen Musters des jeweiligen Parameters in der Reihe 1964-1995 aus den Nachbarpegeln Torgau und Aken nahezu übereinstimmend geschätzt werden. Dies war für den Pegel Tangermünde im Abschnitt Barby-Neu Darchau nicht möglich. Der Effekt der Deichbaumaßnahmen bewirkte Veränderungen im räumlichen Muster der Parameter. Für die Reihe 1936-1995 werden daher in Abbildung 7 nur pegelweise Analyseergebnisse (ohne Tangermünde) dargestellt.

#### *Räumliche Entwicklungstendenzen in den Längsschnitten der Reihen 1964-1995:*

Bei den MQ, nehmen entlang der gesamten Elbe die Abflußwerte mit zunehmendem Einzugsgebiet zu, so daß sich an Nebenflüßmündungen sprunghafte Anstiege ergeben. Diese Zunahme steigt mit zunehmendem Abflußniveau.

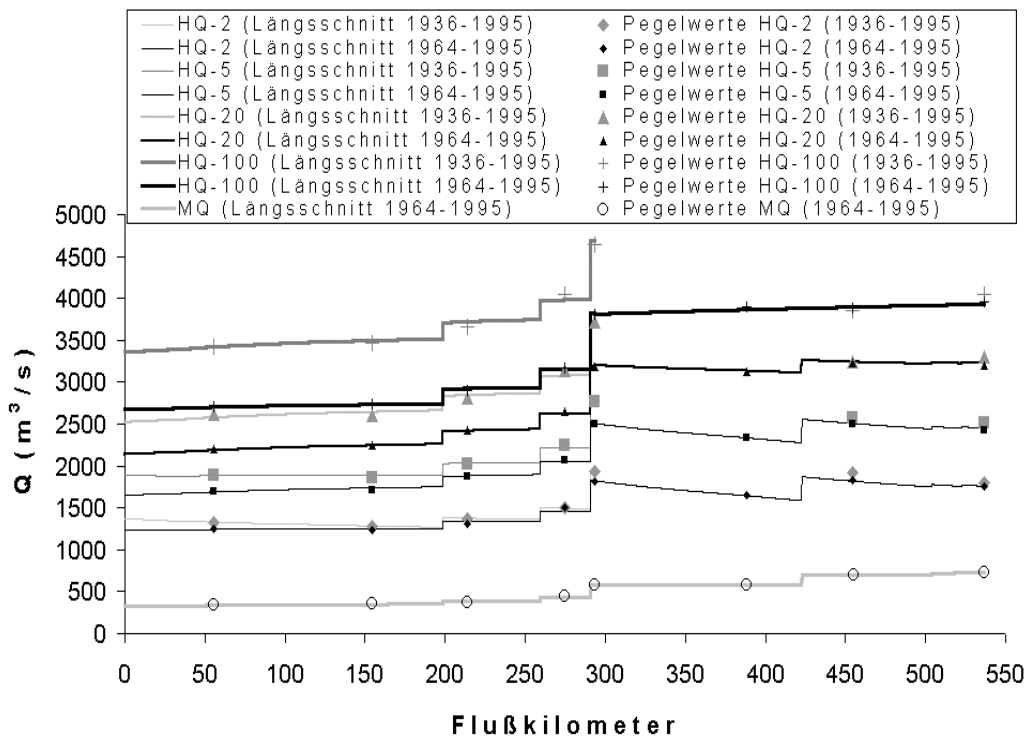
Entsprechendes ist für die HQ(x)T im (bereits untersuchten) oberen Abschnitt festzustellen. Abflachungseffekte sind hier nicht erkennbar.

Für die meisten Dauerlinien-Dezilen findet man diese Entwicklung für die gesamte Elbstrecke. Nur bei den Vegetationszeit-Dezilen ab dem 70%-Dezil aufwärts sind Abnahmen im Verlauf des unteren Abschnitts (von Barby nach Tangermünde) feststellbar.

Beim MHQ und den HQT dominieren im Abschnitt Dresden-Barby ebenfalls Anstiege mit zunehmendem Einzugsgebiet. Es kommt zu sprunghaften und mit zunehmendem Abflußniveau zunehmenden Anstiegen an Einmündungsstellen der Nebenflüsse. Die Scheitelabflachung durch den Wellenablauf im Gerinne ist offenbar relativ schwach. So führt diese zwischen Dresden und Torgau mit geringer Einzugsgebietsdifferenz und langer Fließstrecke (etwa 100 km) nur bei kleineren HQT zu geringfügigen Verminderungen. Die Verhältnisse im unteren Abschnitt unterscheiden sich davon grundlegend. Bei kleineren und häufigeren Ereignissen ergibt sich offensichtlich ein deutlicher Abflachungseffekt beim Wellenablauf im Gerinne, dem eine deutliche Zunahme durch den Zufluß aus dem (großen) Havel-Einzugsgebiet gegenübersteht. Beide Effekte nehmen bei größeren

und selteneren Hochwasserereignissen ab, so daß sich die Abflußwerte der 100-jährlichen Ereignisse zwischen den Pegeln nur relativ geringfügig unterscheiden.

Die räumlichen Tendenzen der VHQT verlaufen - auf geringerem Niveau - ähnlich. Für VHQT100 kann kein Unterschied zu HQ100 festgestellt werden. Bei kleineren Jährlichkeiten sind jedoch im unteren Abschnitt die Abflachungstendenzen schwächer als bei den HQT.



**Abbildung 7:** Hydrologische Längsschnitte der Elbe bzw. Ergebnisse pegelweiser Analysen für ausgewählte Hochwasserparameter des Abflußjahres für die Reihen 1964-1995 und 1936-1995 im Vergleich. Als Referenz: Längsschnitt der MQ 1964-1995.

#### *Veränderungen der Hochwasserverhältnisse im Längsschnitt der Elbe:*

Vergleicht man die Längsschnitte der HQT der Reihe 1964-1995 mit Ergebnissen für die Reihe 1936-1995, so sind Veränderungen entlang der Elbe erkennbar:

Im Abschnitt oberhalb Barby liegen die Werte der Reihe 1936-1995 deutlich höher als die der Reihe 1964-1995, wobei die Differenz mit steigendem Abflußniveau zunimmt. Bis zur Saale-Mündung behalten diese Differenzen etwa die gleiche Größe. Als Ursache ist die vor allem in den 50er/60er Jahren in Tschechien erfolgte Einrichtung von Rückhalteräumen zu nennen, die zur Dämpfung der Hochwasserspitzen geführt haben dürfte.

Im Abschnitt unterhalb von Barby ist ein entgegengesetzter, verschärfender Effekt zu erkennen (Eindeichungen!), der dazu führt, daß an den Pegeln Wittenberge/Neu Darchau der Dämpfungseffekt aus dem Abschnitt oberhalb Barby etwa kompensiert wird.

Ähnliche Veränderungen sind für die VHQT feststellbar.

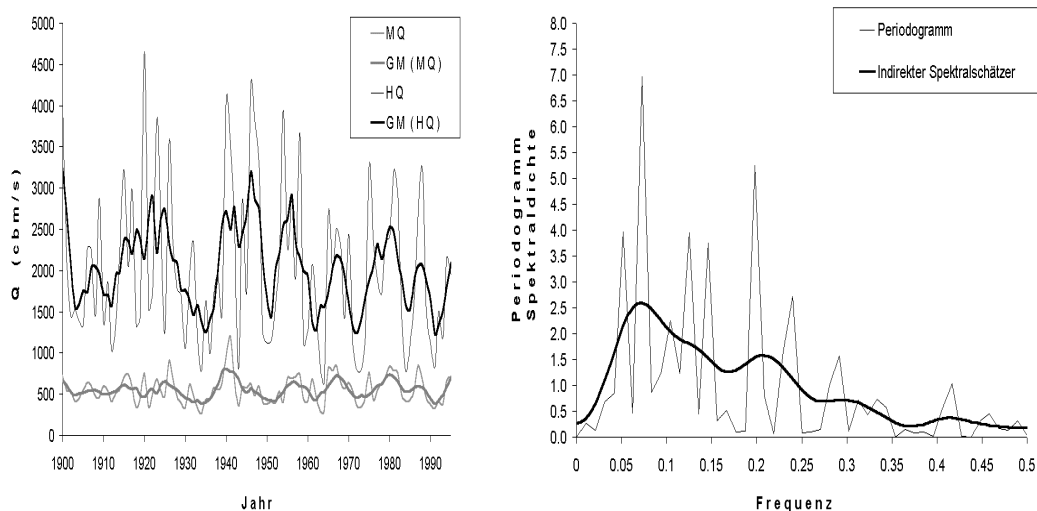
Für den Dämpfungseffekt im Abschnitt oberhalb der Saalemündung ist eine Abschwächung bei den untersuchten  $HQ(x)T$  mit zunehmender Dauer  $x$  beobachtbar.

## 4. Stochastische Analyse und Simulation von Abflußzeitreihen der Elbe

### 4.1. Untersuchung von Jahresreihen auf periodische Strukturen

Gleitende Durchschnitte stellen eine Möglichkeit zur Glättung von Zeitreihen dar. Damit können längerfristige Entwicklungen erkannt werden, wie z. B. die in Abbildung 8 erkennbaren Gruppierungen in Naßjahren und Trockenjahren, die offensichtlich den Abflußbereich oberhalb MQ betrifft. Der Verlauf der gleitenden Durchschnitte läßt eine in den Reihen verborgene Periodizität vermuten. Ein geeignetes Instrument zur Überprüfung dieser Hypothese ist die Periodogramm- und Spektralanalyse. Das Periodogramm stellt die Zerlegung der (normierten) Gesamtvarianz einer Zeitreihe in Varianzbeträge von Schwingungskomponenten verschiedener Fourierfrequenzen  $\lambda$  ( $0 \leq \lambda \leq 0.5$ ) dar und gibt somit ein Maß dafür an, mit welcher Stärke harmonische Wellen dieser Frequenz in der Ausgangsreihe auftauchen. Zudem kann – bei Beachtung des Unschärfepinzips der Spektralschätzung - die theoretische Spektraldichte in konsistenterer Weise als Fouriertransformierte der durch die Gewichtungsfunktion eines geeigneten Parzen-Fensters multiplizierten Autokorrelationsfolge geschätzt werden (indirekte Spektralschätzung).

Das Ergebnis der Anwendung dieser Verfahren auf die Reihe der MQ 1900-1995 am Pegel Barby zeigt die Abbildung 8. Die maximalen Peaks liegen jeweils bei einer Fourierfrequenz von  $0,073$  ( $=7/96$ ), entsprechend einer Periode von etwa 14 Jahren oder einem Wechsel von 7 Naß- und 7 Trockenjahren.



**Abbildung 8:** 5-jährige gleitende Durchschnitte der Reihen HQ und MQ 1900-1995 für den Pegel Barby, sowie Periodogramm und Spektralschätzer für die Reihe MQ1900-1995.

Bei dem kleineren Maximum bei einer Frequenz von 0.208 ( annähernd Vielfaches der Fundamentalfrequenz 0.073) liegt der Verdacht einer Oberschwingung nahe, die sich mit einem nicht-sinusförmigen Charakter der Fundamentalfrequenz begründen ließe.

Für eine Reihe der jährlichen Höhen einer vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellte Zeitreihe der Gebietsniederschläge des Elbe-Einzugsgebiets oberhalb der Saalemündung (inklusive Saale-Einzugsgebiet) von 1962 bis 1995 und für die Reihe der MQ des Pegels Barby über den gleichen Zeitraum zeigt sich deutlich eine Ähnlichkeit in den Periodogrammverläufen der beiden Reihen. Es ist somit davon auszugehen, daß das langfristige Niederschlagsgeschehen verantwortlich ist für die angesprochene Entwicklung des Abflußprozesses.

Diese Entwicklung, die sich nach Abbildung 8 auch in den Hochwasserabflüsse abzeichnet, ist von Bedeutung für Untersuchungen in Auen der Elbe. Rückschlüsse aus Untersuchungen begrenzter Dauern (einige Jahre) sollten diesen Langzeitaspekts berücksichtigen.

#### 4.2. Simulation von Zeitreihen mittlerer täglicher Abflußwerte

Die hydrologische Modellierung im betrachteten Skalenbereich ist mit Problemen verbunden. Insbesondere ist ein Kompromiß zu finden zwischen einer begründbaren Prozeßrepräsentation und einer die Unsicherheiten der Simulationsausgänge begrenzenden, parameter-sparenden Modellformulierung.

Im Hinblick auf große Unsicherheiten bei der Niederschlagsmessung und bei der Gebietsniederschlagsermittlung und auf die Tatsache, daß für das tschechische Gebiet nur wenige Niederschlagsmeßreihen verfügbar sind, stellt das stochastische Modell zur Simulation von Tagesabflüssen nach Treiber, B., 1975, einen geeigneten Ansatz dar. Es handelt sich um ein Modell zur Simulation mittlerer täglicher Abflußwerte, dessen Grundstruktur in Abbildung 9 gezeigt ist. Die gemessenen Abflüsse werden aufgefaßt als Ausgänge aus einem linearen, zeitvarianten System. Der Eingang in dieses System besteht aus fiktiven Impulsen von je einem Tag Dauer, die allein aufgrund der gemessenen Abflußreihe abgeleitet werden. Diese Impulse sind mit einer variablen Systemfunktion zum Systemausgang zu falten. Die Impulse lassen sich interpretieren als effektive Niederschläge, die variable Systemfunktion als variable (gedächtnisabhängige) Retentionseigenschaft.

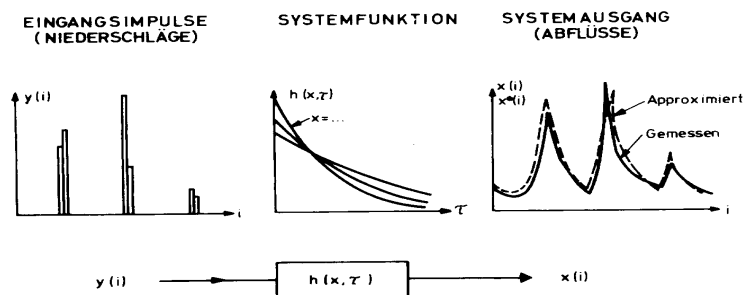


Abbildung 9: Struktur des Modells nach Treiber (aus Treiber, B., 1975)

Der Arbeitsablauf erfolgt in drei Schritten:

1. *Modellanpassung für Impulse und variable Systemfunktion* mit iterativen Verfahren.
2. *Erstellung eines Modells zur Simulation der Eingangsimpulse* mit monatsweise variierenden Parametern. Zunächst wird die Reihe trockener und nasser Tage mit Hilfe eines Markov-Ketten-Modells simuliert, anschließend die Höhe der Impulse als Markov-Prozeß erster Ordnung mit Weibull-verteilterm unabhängigem Zufallsglied.
3. *Abflußreihen-Generierung*: Faltung simulierter Impulse mit variabler Systemfunktion.

Für die Anwendung des Modells auf die Elbe oberhalb von Barby ist eine geeignete Untergliederung ihres Einzugsgebiets vorzunehmen. Die Untergliederung sollte nicht zu fein sein, um zu starke Effekte zufallsbedingter und zwischen den Teilgebieten zu schwach korrelierter Reaktionen zu vermeiden. Andererseits würde eine zu grobe Unterteilung zur zu starken Mittelung räumlich variabler Ausprägungen von Gebietseigenschaften und (großräumigen) Niederschlagsereignissen führen, was in bezug auf die beabsichtigte Regionalisierung und auf die Prognose in Szenarien problematisch ist.

Um Aufschluß hierzu zu erlangen, werden unter Anwendung eines Translations-Diffusions-Modells mit von der Bundesanstalt für Gewässerkunde zur Verfügung gestellten Parametern des ELBA-Modells Ganglinien geroutet und an den unterliegenden Pegeln von den dort gemessenen Ganglinien abgezogen. Diese Differenzganglinien stellen geschätzte Ganglinien der Zwischengebiete der am Routing beteiligten Pegel dar.

Um festzustellen, ob solche Ganglinien verschiedener Teilgebiete an gemeinsamen Bezugspunkten korrelieren, in welcher Weise also Gebiete prozeßgerecht aggregierbar sind, werden die Differenzganglinien – unter Annahme vollständiger Durchmischung mit dem Gesamtabfluß – ebenfalls geroutet. Für die an gemeinsamen Bezugspunkten erhaltenen Ganglinien werden Korrelationsanalysen durchgeführt. Dabei zeigt sich, daß die Korrelationen mit zunehmender Gebietsgröße zunehmen. Dies läßt sich mit gedämpften Reaktionen großer Einzugsgebiete erklären. Großräumige und räumlich homogenere Niederschlagsereignisse prägen hier die Abflußganglinie. Korrelationskoeffizienten größer als 0.7 finden sich erst bei einer Aggregation bis zu den Teilgebieten 'oberhalb des Pegels Dresden', 'Gebiet zwischen Dresden und Aken', 'Gebiet zwischen Aken und Barby', so daß eine Anwendung des Treiber-Modells auf diese Gebiete sinnvoll erscheint.

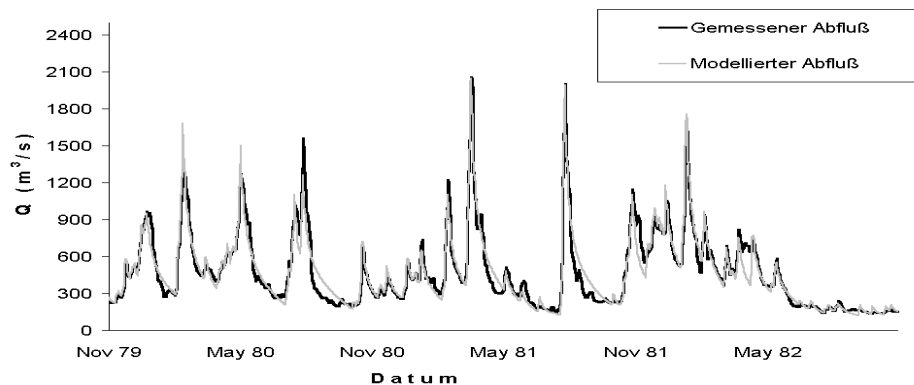
Bis zum aktuellen Zeitpunkt erfolgte dies für die Reihen 1964-1995 des Pegels Dresden (Ganglinie am Pegel, sowie die zum Pegel Aken geroutete Ganglinie) und des Zwischengebiets 'Dresden – Aken'. Nach Anpassung des Modells wurden je 20 Generierungsläufe der der Beobachtungsreihe entsprechenden Länge durchgeführt. Die gemessene und zum Pegel Aken geroutete Ganglinie des Pegels Dresden, sowie die daran angepaßte Ganglinie in den Abflußjahren 1980-1982 zeigt Abbildung 10. Weitgehende Übereinstimmung ist erkennbar. Diese bestätigt sich auch durch ein Effizienzkriterium nach Nash/Sutcliffe von 0.94 (ebenfalls 0.94 für logarithmierte Werte zur Betonung der Niedrigwasserabflüsse). Bei der Ganglinie des Gebiets 'Dresden-Aken' ergeben sich 0.92 (0.91).

Eine umfassendere Beurteilung der Modellgüte und der statistischen Äquivalenz der gemessenen Reihen mit den generierten Reihen erlauben Vergleiche monats- und jahresbezogener Verteilungsfunktionen von Spitzenabflüssen und mittleren Abflüssen, Vergleiche monatsbezogener Verteilungsfunktionen von Tagesabflüssen und Vergleiche des Jahresgangs der Monatsmittel.

Es kann eine grundsätzlich gute Eignung des Modellansatzes auch gegenüber dieser umfassenden Diagnose festgestellt werden. Die Ausprägungen der gemessenen Reihen liegen meist in einem Bereich der auch durch die 20 generierten Reihen abgedeckt wird.

Neben Gütekriterien liefert die Diagnose Hinweise auf geeignete Weiterentwicklungen des Modellansatzes. Dies betrifft folgende Aspekte:

- Die Beobachtung einer häufigen Überschätzung kleiner und Unterschätzung größerer Jahresscheitelabflüsse spricht dafür, daß im Modell die (nichtlineare) Gebietsreaktion einer schnellen Abflußkomponente verbessert werden kann.
- Frühjährliche Abflüsse werden in allen Größenbereichen unterschätzt. Es ist anzunehmen, daß die Abweichungen auf einem langsamen Anschwellen langsamer Abflußkomponenten beruht, das mit (zeitlich scharfen) Impulsen im Treiber-Modell nicht geeignet modelliert wird. Dabei ist eine nivale Komponente zu beachten.
- Die Jahresmittel der gemessenen Reihen besitzen eine größere Variabilität als die der generierten Reihen. Dies ist als Hinweis auf eine Persistenz im Abflußgeschehen zu sehen, die in der weiteren Modellentwicklung einbezogen werden sollte.



**Abbildung 10:** Gemessene und zum Pegel Aken geroutete Abflußganglinie des Pegels Dresden in den Abflußjahren 1980-1982 und daran angepaßte Modellausgänge des Treiber-Modells.

Als Fazit zur Anwendung des Treiber-Modells auf die genannten Reihen ist festzuhalten, daß das Modell in seiner aktuellen Form bereits als wertvolles Instrument gesehen werden kann für eine Generierung von statistisch weitgehend zu Meßreihen äquivalenten Reihen, die durch das Modell beliebig verlängerbar sind und damit Aussagen über die Wahrscheinlichkeit interessierender Abflußereignissen zulassen. Dabei ist die Anwendung auf große Teileinzugsgebiete zu beschränken, da sonst nur geringe Korrelationen von Impulsen aus Teilgebieten und damit kaum Aussage für Abflußreihen der Elbe zu treffen sind. Die Korrelationsstrukturen der Impulsreihen für die genannten Teilgebiete sollen in weiteren Arbeitsschritten untersucht werden, um die Möglichkeit dieses Ansatzes regionaler Differenzierung im Modell zu prüfen. Hier stellt die von Kron, W., 1996, entwickelte Erweiterung des Treiber-Modells zur simultanen Generierung von Abflußreihen an zwei Pegeln eine Perspektive dar. Für Stellen innerhalb der Zwischengebiete der großräumig strukturierten Modellanwendung stellen das genannte Translations-Diffusions-Modell und überlagernde Zufallsglieder mögliche Instrumente dar.

Die Diagnose zeigte bereits einige Aspekte zur Weiterentwicklung des Modells, die sich an einer besseren physikalischen Fundierung des stochastisch geprägten Ansatzes und insbesondere an der Einbeziehung von Gebietsniederschlägen orientieren soll.

Die Tatsache, daß – gerade in Einzugsgebieten der betrachteten Skale – langsam reagierende Anteile des Abflußprozesses anderen Gesetzmäßigkeiten folgen als schneller reagierende, ist evident. Die Diagnose zeigt für das Treiber-Modell, daß diese Differenzierung verbesserungsfähig ist. Als grundlegendste Notwendigkeit bei der Modellentwicklung ergibt sich daher zunächst eine Komponenten-Differenzierung des Abflusses, insbesondere mit Berücksichtigung langsamerer Abflußkomponenten. Bei Integration solcher Basisabflußkomponenten in den Modellansatz ist neben der Verbesserung der Modellierung dieser selbst auch ein schärferer Bezug des Treiber-Modells auf eine schnelle Abflußkomponente möglich, so daß auch hier eine Verbesserung zu erwarten ist.

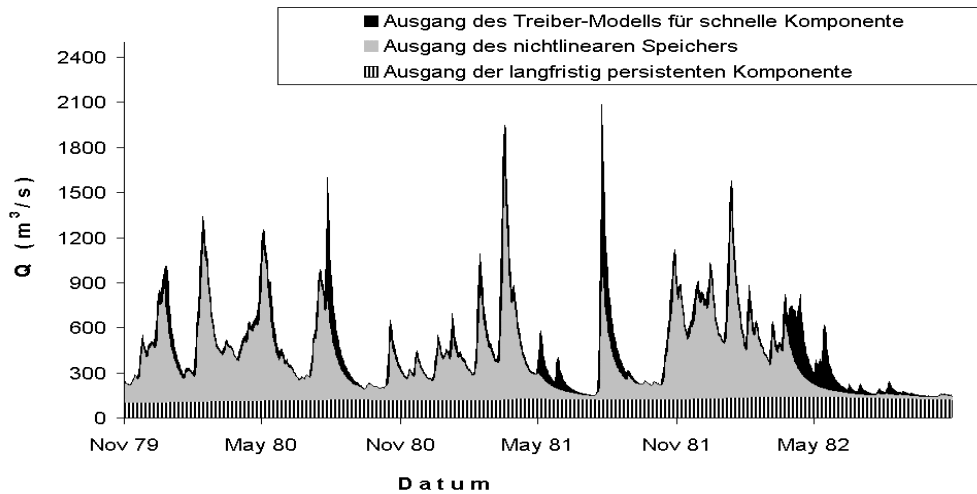
Ein im Rahmen dieser Modellentwicklung geeigneter Ansatz für Basisabflußkomponenten ist der eines oder mehrerer Speicher, deren Eigenschaften anhand der verfügbaren Informationen in der Abflußganglinie mathematisch zu formulieren sind. Hierzu werden Rezessionskurven der Ganglinien untersucht. Diese liefern – nach semilogarithmischer Auftragung – Hinweise auf ein nichtlineares Speicherverhalten, das nach einer geohydraulischen Analogiebetrachtung auch physikalisch begründbar ist ( zum Vgl. Wittenberg, H., 1997). Im Konzept des nichtlinearen Speichers nach Wittenberg, H., 1997, werden aus Rezessionskurven Parameter eines nichtlinearen Speichers ermittelt, der Grundlage für die Modellierung und für die Separation einer Basisabflußkomponente ist.

Die aus jeweils *einer* Ganglinie extrahierten Rezessionskurven zeigen eine erhebliche Variabilität. Um diese nicht durch 'master recession curves' zu mitteln, sondern die in der Variabilität enthaltene Information für ein Prozeßverständnis und dessen Formulierung im Modell zu nutzen, werden Rezessionskurven nach einem schrittweise modifizierten Katalog von Kriterien ausgewählt. Dieser Katalog beinhaltet Mindestauern, Start- und Endkriterien, Verlauf der Rezessionskurven (Vergleich nach 'matching strip'), die kurz- und langfristige hydrologische Vorgeschichte und die Jahreszeit.

Für eine Einengung der geschätzten Parameterbereiche des nichtlinearen Speichers erwies sich dabei unter anderem die längerfristige hydrologische Vorgeschichte als bedeutend, die über eine langfristig persistente Abflußkomponente berücksichtigt werden kann. Diese wird - im Zusammenhang mit dem Gesamtabfluß - durch einen autoregressiven Ansatz realisiert, der sich im Hinblick auf die Konsistenz des Gesamtmodells auch mit der konzeptionellen Speichervorstellung in Einklang bringen läßt.

Unter Verwendung der beiden genannten Ansätze lassen sich, wie in Abbildung 11 gezeigt, zwei Basisabflußkomponenten abtrennen und die verbleibende schnelle Abflußkomponente mit dem Treiber-Modell simulieren. Die Anpassungsgüte wird dadurch nochmals merklich verbessert: für die vom Pegel Dresden zum Pegel Aken geroutete Ganglinie ergibt sich ein Effizienzkriterium von 0,976 (0,981)! Nach der Anwendung der oben beschriebenen umfassenderen Diagnose auf die schnelle Abflußkomponente und ihre Simulationsergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden:

Die statistischen Eigenschaften werden deutlich besser wiedergegeben als bei der Anwendung des Treiber-Modells auf den Gesamtabfluß. Auch variieren die Eigenschaften der Simulationsläufe wesentlich schwächer. Die für die Modellierung des Gesamtabflusses mit dem Treiber-Modell genannten Probleme werden reduziert oder beseitigt.



**Abbildung 11:** Simulierte Ausgänge des Treiber-Modells für eine schnelle Abflußkomponente nach Abtrennung zweier Basisabflußkomponenten

Für die weitere Entwicklung und physikalische Fundierung ist die Einbeziehung von Gebietsniederschlägen vorgesehen. Anteile dieser müssen dabei nach einem geeigneten Aufteilungsprinzip die Eingänge in Systeme der verschiedenen Abflußkomponenten bilden. Dies erfordert nichtlineare Transformationen. Hierzu wird ein Konzept verfolgt, bei dem im Rahmen des Prinzips der fortschreitenden Modifizierung zunächst mit einem einfachen (Begleit-)Modell der Systemausgang (Abfluß) geschätzt wird. Als Abflußschätzung noch nicht ausreichend liefert diese Schätzung jedoch ein zeitvariantes Maß für den Systemzustand (Vorfeuchte). Durch nichtlineare, gedächtnislose Transformationen ist dieses Maß in einen zeitvarianten Gewinnfaktor umzurechnen, der in einem Hauptmodell zustandsabhängig und zeitvariant die Systemausgänge verstärkt. Dieses Modell soll in Ergänzung zur Simulation mit dem Treiber-Modell eingesetzt werden, um im Sinne der anfangs genannten Ziele die hydrologischen Rahmenbedingungen besser zu erfassen und um als Interpolationshilfe für Zwischengebiete zu dienen.

## Literatur

- Kron, W. (1996): Stochastische Simulation des Geschiebetransports am Zusammenfluß zweier Gewässer. Mitt. des Inst. für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Univ. Karlsruhe (TH), Heft 59.
- Treiber, B. (1975): Ein stochastisches Modell zur Simulation von Tagesabflüssen; Mitteilungen des Instituts für Wasserbau III der Universität Karlsruhe (TH), Heft 5.
- Simon, M. (1996): Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Elbe; Untersuchungsbericht der Int. Kommission zum Schutz der Elbe, Magdeburg
- Glugla, G. Ilse, J. und Fürtig, G. (1996): Überarbeitung der Abflußkurven am Pegel Torgau für die Jahre 1971-1993; BfG-Bericht 1041.
- PLATE, E. J. (1994): Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure; Verlag Ernst u. Sohn; Berlin.
- Wittenberg, H. (1997) Der nichtlineare Speicher als Alternative zur Beschreibung von Basisabfluß, Grundwasserspeicherung und Trockenwetterganglinie. Wasserwirtschaft 87 (1997) 12, 570-574