

# HALBGRUPPEN UND RESOLVENTEN IN DER POTENTIALTHEORIE

Autor(en): **Bauer, Heinz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **L'Enseignement Mathématique**

Band (Jahr): **25 (1979)**

Heft 1-2: **L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE**

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-50369>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# HALBGRUPPEN UND RESOLVENTEN IN DER POTENTIALTHEORIE <sup>1</sup>

von Heinz BAUER

Der Vortrag verfolgte das Ziel, an Hand einiger neuer Resultate der Potentialtheorie die zunehmend deutlicher werdende zentrale Rolle von Halbgruppen und Resolventen in dieser Theorie aufzuzeigen. Der Verfasser hofft, damit auch einen Beitrag zu einer Standortbestimmung der Potentialtheorie zu liefern.

## 1. EIN BLICK AUF DIE KLASSISCHE THEORIE

Klassische Potentialtheorie heißt einerseits (lokaler Aspekt) das Studium der *Laplaceschen Differentialgleichung*

$$(1) \quad \Delta h = 0$$

im  $\mathbf{R}^n$ , wobei wir uns auf den Fall  $n \geq 3$  beschränken, und andererseits (globaler Aspekt) das Studium der *Newtonschen Kernfunktion*

$$(2) \quad N(x) = \frac{1}{|x|^{n-2}} \quad (x \in \mathbf{R}^n). \quad ^2)$$

Aus ihr leiten sich die global definierten *Potentiale*  $p$  ab. Dies sind alle Funktionen  $p: \mathbf{R}^n \rightarrow [0, +\infty]$ , welche nicht konstant gleich  $+\infty$  sind und eine (notwendigerweise eindeutige) Darstellung

$$(3) \quad p = N * \mu$$

besitzen, wobei  $\mu$  ein positives Radon-Maß auf  $\mathbf{R}^n$  ist. Eine nicht-negative Funktion  $u: \mathbf{R}^n \rightarrow [0, +\infty]$  heißt *hyperharmonisch* (auf  $\mathbf{R}^n$ ), wenn sie von der Form

$$u = N * \mu + h$$

---

<sup>1</sup>) Ausarbeitung eines am 10. April 1978 an der ETH Zürich im Rahmen des International Symposium on Analysis gehaltenen Vortrages. Dieser Artikel wurde bereits in *Contributions to Analysis*, Monographie de l'Ens. Math. N° 27, Genève 1979, veröffentlicht.

<sup>2</sup>)  $|x|$  bezeichnet die euklidische Norm des Vektors  $x \in \mathbf{R}^n$ .

ist, wobei jetzt  $\mu$  ein beliebiges Radon-Maß  $\geq 0$  auf  $\mathbf{R}^n$  und  $h$  eine positive harmonische Funktion auf  $\mathbf{R}^n$ , also eine (in diesem Fall konstante) Lösung  $h \geq 0$  von (1) ist. Diese hyperharmonischen Funktionen  $u \geq 0$  können als nach unten halbstetige Funktionen durch die übliche Mittelwert-eigenschaft (Rieszscher Zerlegungssatz) oder durch die Gültigkeit von  $\Delta u \leq 0$  im distributions-theoretischen Sinne gekennzeichnet werden.

Klassische Potentialtheorie muß aber auch unter dem Aspekt des Studiums der Brownschen Halbgruppe gesehen werden. Dieser (ebenfalls globale) Aspekt tritt historisch gesehen erst viel später in Erscheinung, nämlich durch die bahnbrechenden Arbeiten von KAKUTANI [21], [22]. Die *Brownsche Halbgruppe* (oder die Halbgruppe der Brownschen Bewegung) ist dabei die Faltungshalbgruppe  $(v_t)_{t>0}$  der Wahrscheinlichkeitsmaße

$$(4) \quad v_t = g_t \lambda^n,$$

wobei  $\lambda^n$  das  $n$ -dimensionale Lebesgue-Maß und  $g_t$  die Dichte

$$(5) \quad g_t(x) = (4\pi t)^{-\frac{n}{2}} \exp\left(-\frac{|x|^2}{4t}\right)$$

ist. Wie üblich interpretieren wir  $v_t$  als einen Kern, d.h. als den durch Faltung wirkenden Operator  $P_t$ :

$$P_t f = v_t * f.$$

Dieser operiert auf den beschränkten sowie auf den nicht-negativen Borel-meßbaren Funktionen linear und positiv. Somit erscheint die Faltungshalbgruppe  $(v_t)_{t>0}$  als eine Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$  von Kernen.

Bezüglich einer solchen Halbgruppe heißt eine nicht-negative Funktion  $u: \mathbf{R}^n \rightarrow [0, +\infty]$  *exzessiv*, wenn sie Borel-meßbar ist und der Bedingung

$$(6) \quad \sup_{t>0} P_t u = u$$

genügt. Die potentialtheoretische Bedeutung dieser Halbgruppe wird deutlich durch den fundamentalen Satz von DOOB [15] und HUNT [20]:

1.1. *Die exzessiven Funktionen bezüglich der Brownschen Halbgruppe fallen mit den nicht-negativen hyperharmonischen Funktionen zusammen.*

Der analytische Grund für diesen Zusammenhang ist die Gleichheit

$$(7) \quad \int_0^\infty g_t(x) dt = c_n N(x) \quad (x \in \mathbf{R}^n)$$

mit dem positiven Faktor

$$c_n = \frac{1}{4\pi^{n/2}} \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right).$$

Der sich durch Integration der Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$  ergebende Kern

$$(8) \quad V = \int_0^{\infty} P_t dt$$

ist somit nichts anderes als der durch Faltung mit Hilfe des Maßes

$$(9) \quad \kappa = c_n N \lambda^n$$

wirkende Kern  $Vf = \kappa * f$ .

Damit sind es die drei Objekte  $\Delta$ ,  $N$  und  $(P_t)_{t>0}$ , die im Mittelpunkt der klassischen Potentialtheorie stehen. Jedes dieser Objekte erlaubt die Definition der (global definierten) hyperharmonischen Funktionen  $\geq 0$ . Aus der Kenntnis eines dieser Objekte folgt die der anderen, denn  $N$  ist die Fundamentallösung von (1), interpretiert als der zu  $\kappa$  gehörige Faltungskern  $V$ , berechnet sich  $N$  gemäß (8) aus  $(P_t)_{t>0}$ , ferner ist  $\Delta$  der infinitesimale Erzeuger von  $(P_t)_{t>0}$ , d.h. es gilt

$$(10) \quad \Delta f = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{P_t f - f}{t}$$

für alle Funktionen  $f \in C^2(\mathbf{R}^n)$  mit kompakten Träger. Hierzu vergleiche man BERG-FORST [7].

Der Satz 1.1 ist der Schlüssel zum wahrscheinlichkeitstheoretischen Verständnis potentialtheoretischer Begriffsbildungen. Hierauf soll aber hier nicht eingegangen werden. (Vgl. jedoch [2].)

## 2. HARMONISCHE RÄUME UND FELLERSCHE HALBGRUPPEN

Die weiteren Teile des Vortrages werden vor allem durch die Frage nach dem Zusammenhang zwischen lokaler Potentialtheorie und Halbgruppen von Kernen motiviert.

Als lokale Potentialtheorie verstehen wir dabei die Theorie der harmonischen Räume, die sich aus der Idee entwickelt hat, die Theorie der Laplace-Gleichung (1) auf allgemeinere elliptische und parabolische Differentialgleichungen etwa mit einer differenzierbaren Mannigfaltigkeit als Grundraum zu entwickeln. (Vgl. hierzu [1], BRELOT [10], [11], [12] und CONSTANTINESCU-CORNEA [13].)



Der Einfachheit halber sollen hier harmonische Räume nur im Sinne von BRELOT [10] verstanden werden. Es sei demnach  $X$  ein lokal-kompakter, (Hausdorff-) Raum und  $\mathcal{H}$  ein Garbendatum von Vektorräumen stetiger reeller Funktionen.  $(X, \mathcal{H})$  heißt dann ein *Brelot-Raum*, wenn  $X$  keine isolierten Punkte besitzt und lokal-zusammenhängend ist, eine Basis regulärer Mengen existiert (per definitionem ist für diese das Dirichletsche Problem für alle stetigen Randwerte eindeutig und „positiv“ lösbar) und das Brelotsche Konvergenzaxiom erfüllt ist. Wir werden nur *strenge* oder  $\mathfrak{B}$ -Brelot-Räume betrachten, also solche mit mindestens einem Potential  $p \neq 0$ . Die Definition dieser Begriffsbildungen findet man in [10], [11] und [1]. Für  $n \geq 3$  liefert das Garbendatum  $\mathcal{H}_\Delta$  der Lösungen von (1), also der klassischen harmonischen Lösungen, den strengen Brelot-Raum  $(\mathbb{R}^n, \mathcal{H}_\Delta)$ .

Ausgelöst durch die Untersuchung Markovscher Prozesse haben sich in zunehmendem Maße spezielle Halbgruppen von Kernen als wichtig erwiesen. Auf einem lokal-kompakten Raum  $X$  mit abzählbarer Basis sei  $(P_t)_{t>0}$  eine Halbgruppe von *Kernen*. Jedes  $P_t$  ist also eine Funktion auf  $X \times \mathfrak{B}_X$ , wobei  $\mathfrak{B}_X$  die  $\sigma$ -Algebra der Borelschen Mengen bezeichnet; für jedes  $A_0 \in \mathfrak{B}_X$  bzw.  $x_0 \in X$  werden dabei die Abbildungen  $A \mapsto P_t(x_0, A)$  bzw.  $x \mapsto P_t(x, A_0)$  als nicht-negative Maße auf  $\mathfrak{B}_X$  bzw. als (nicht-negative) Borel-meßbare Funktionen vorausgesetzt. Durch Integration nach der zweiten Variablen wirkt jedes  $F$  als linearer Operator auf geeigneten Räumen meßbarer Funktionen:

$$(11) \quad P_t f(x) = \int P_t(x, dy) f(y)$$

(z.B. für Borel-meßbares  $f \geq 0$ ). Die Halbgruppeneigenschaft besagt nichts anderes als

$$(12) \quad P_{s+t} f = P_s P_t f$$

für alle Borel-meßbaren Funktionen  $f \geq 0$  und für alle  $s, t > 0$  oder — äquivalent hierzu —

$$(13) \quad P_{s+t}(x, A) = \int P_s(x, dy) P_t(y, A)$$

für alle  $x \in X$  und  $A \in \mathfrak{B}_X$ . Es müssen also die sogenannten Chapman-Kolmogorov-Gleichungen erfüllt sein.<sup>1)</sup>

Eine solche Halbgruppe von Kernen heißt *Fellersch*, wenn jeder Kern  $P_t$  sub-Markovsch, also  $P_t 1 \leq 1$  erfüllt ist, wenn  $P_t$  den Raum  $C_0(X)$  der im Unendlichen verschwindenden, stetigen, reellen Funktionen auf  $X$  in sich abbildet, und wenn außerdem

<sup>1)</sup> Vgl. hierzu [3] und MEYER [24].

$$\lim_{t \rightarrow 0} P_t f = f \quad \text{für alle } f \in C_0(X)$$

im Sinne der gleichmäßigen Konvergenz erfüllt ist. Einer solchen Fellerschen Halbgruppe sind wir in der klassischen Theorie bereits begegnet: die Brownsche Halbgruppe ist Fellersch. Jeder der Kerne  $P_t$  ist dort sogar Markovsch, erfüllt also  $P_t 1 = 1$ .

Eines der Leitmotive für die Entwicklung der Theorie der harmonischen Räume war, über Jahre hinweg, die Frage nach der Existenz einer Halbgruppe von Kernen auf einem streng harmonischen Raum  $(X, \mathcal{H})$  derart, daß, wie in der klassischen Theorie, die exzessiven Funktionen mit den hyperharmonischen Funktionen  $\geq 0$  auf  $X$  übereinstimmen. Hyperharmonisch heißen dabei die durch die Mittelwerteigenschaft (für reguläre Mengen) definierten nach unten halbstetigen Funktionen. Die Antwort auf diese Frage ist Ja. Sie wurde durch MEYER [23] für Brelotsche und später durch BOBOC-CONSTANTINESCU-CORNEA [9] und HANSEN [18], [19] für allgemeinere Typen harmonischer Räume gegeben:

2.1. *Auf einem streng harmonischen Raum  $(X, \mathcal{H})$  existieren stets ein strikt positives, stetiges, reelles Potential  $q$  und eine Fellersche Halbgruppe  $(Q_t)_{t>0}$  derart, dass deren exzessive Funktionen mit den mit  $\frac{1}{q}$  multiplizierten nicht-negativen hyperharmonischen Funktionen übereinstimmen.*

*Ist die konstante Funktion 1 hyperharmonisch, so fallen die nicht-negativen hyperharmonischen Funktionen mit den exzessiven Funktionen der neuen Halbgruppe*

$$(14) \quad P_t f = q Q_t \left( \frac{1}{q} f \right) \quad (f \in C_0(X))$$

*zusammen.*

Man nennt die Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$  auf Grund ihrer Herkunft auch *quasi-Fellersch*.

### 3. DER SATZ VON G. FORST

Im Gegensatz zu der dem Resultat 2.1 zugrunde liegenden Fragestellung ist die umgekehrte Frage nach Eigenschaften einer Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$  von Kernen auf einem Raum  $X$ , welche die Existenz eines Garbendatums  $\mathcal{H}$  garantieren, so daß  $(X, \mathcal{H})$  ein harmonischer Raum und die exzessiven Funktionen von  $(P_t)_{t>0}$  mit den hyperharmonischen Funktionen  $\geq 0$  zusammenfallen, neueren Datums. Es sind nur Teilantworten bekannt.

Jede Teilantwort ist aber von Interesse, da sie erhoffen läßt, dem Problem der Produktbildung harmonischer Räume näher zu treten.

Sind nämlich  $(P_t)_{t>0}$  und  $(P'_t)_{t>0}$  Halbgruppen von Kernen auf lokal-kompakten Räumen  $X$  bzw.  $X'$ , so liefert die Bildung der Produktmaße

$$Q_t((x, x'), \cdot) = P_t(x, \cdot) \otimes P'_t(x', \cdot)$$

eine Halbgruppe  $(Q_t)_{t>0}$  von Kernen auf  $X \times X'$ . Sind  $(P_t)_{t>0}$  und  $(P'_t)_{t>0}$  im Sinne von Satz 2.1 mit harmonischen Strukturen  $\mathcal{H}$  auf  $X$  bzw.  $\mathcal{H}'$  auf  $X'$  verknüpft und läßt sich mit Hilfe allgemeiner Sätze entscheiden, ob auch  $(Q_t)_{t>0}$  zu einer harmonischen Struktur gehört, so liegt es nahe, diese als ein Produkt der harmonischen Räume  $(X, \mathcal{H})$  und  $(X', \mathcal{H}')$  zu interpretieren. Zu diesem Problem sind gerade in letzter Zeit Resultate von U. SCHIRMEIER [28] erzielt worden. Hier geht es uns nur um den Hinweis auf die grundsätzliche Bedeutung dieser Fragestellung: Wir werden sehen, daß sie selbst unter stark einschränkenden Zusatzannahmen zu neuen, überraschenden Beispielen harmonischer Räume führt.

Es werde jetzt nämlich vorausgesetzt, daß der lokal-kompakte Grundraum eine lokal-kompakte abelsche Gruppe  $G$  mit abzählbarer Basis ist; ferner sei die gegebene Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$  Fellersch und translationsinvariant, also

$$P_t(f \circ \tau_{-a}) = \tau_a(P_t f)$$

für jede Translation  $\tau_a(x) = x + a$  erfüllt ( $t > 0$ ,  $f$  Borel-meßbar  $\geq 0$ ). Diese und allein diese Halbgruppen rühren von Faltungshalbgruppen  $(\mu_t)_{t>0}$  von positiven Radon-Maßen auf  $G$  her, d.h. es gilt

$$(15) \quad P_t f = \mu_t * f.$$

*Faltungshalbgruppe* heiße dabei, daß neben

$$(16) \quad \mu_{s+t} = \mu_s * \mu_t \quad \text{für } s, t > 0$$

die Bedingungen

$$(17) \quad \mu_t(G) \leq 1 \quad (t > 0)$$

und

$$(18) \quad \lim_{t \rightarrow 0} \mu_t = \varepsilon_0$$

(in der vagen Topologie) erfüllt sind.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>  $\varepsilon_0$  bezeichnet die Einheitsmasse in 0. Zu diesem und den folgenden Resultaten über Faltungshalbgruppen vom lokalen Typ vergleiche man BERG-FORST [7].

Eine solche Faltungshalbgruppe heißt vom *lokalen Typ*, wenn für ihren infinitesimalen Erzeuger  $A$  mit Definitionsbereich  $D_A \subset C_0(G)$  gilt: ist  $f \in D_A$  Null in der Umgebung eines Punktes  $x \in G$ , so ist  $f$  an der Stelle  $x$  gleich Null. Im Fall einer *symmetrischen* Halbgruppe, wo also jedes der Maße  $\mu_t$  bei der Spiegelung  $x \mapsto -x$  in sich übergeht, ist dies äquivalent zum folgenden Verhalten der Fourier-Transformierten  $\hat{\mu}_t$  von  $\mu_t$ : es gibt eine stetige quadratische Form  $q$  auf der Charaktergruppe  $\hat{G}$  und eine Konstante  $c \geq 0$  mit

$$(19) \quad \hat{\mu}_t = e^{-t(c+q)} \quad \text{für alle } t > 0.$$

Eine wichtige Beantwortung der zu Beginn dieses Abschnittes gestellten Frage gibt der folgende Satz von FORST [17]:

3.1. Sei  $G$  eine nicht diskrete, lokal-kompakte abelsche Gruppe mit abzählbarer Basis. Ferner sei  $(\mu_t)_{t>0}$  eine Faltungshalbgruppe von Massen mit folgenden Eigenschaften:

- (i)  $(\mu_t)$  ist symmetrisch und vom lokalen Typ;
- (ii) die Halbgruppe ist transient, d.h. es existiert das Integral

$$\kappa(f) = \int_0^{\infty} \mu_t(f) dt$$

für jede Funktion  $f \in C_0(G)$  mit kompaktem Träger;

- (iii) bezüglich des Haarschen Masses  $\Theta$  von  $G$  besitzt das Mass  $\kappa$  eine nach unten halbstetige Dichte  $N$ , welche auf  $G \setminus \{0\}$  stetig und reell ist. Dann existiert ein translationsinvariantes, symmetrisches Garbendatum  $\mathcal{H}$  auf  $G$  derart, dass  $(G, \mathcal{H})$  ein strenger Brelot-Raum und  $N$  ein in  $G \setminus \{0\}$  harmonisches Potential ist.

Aus einem Resultat von BLIEDTNER [8] folgt ferner

3.2. Die nicht-negativen hyperharmonischen Funktionen auf  $G$  fallen mit den exzessiven Funktionen der gegebenen Faltungshalbgruppe zusammen.

Speziell ordnet sich die klassische Potentialtheorie in das Ergebnis von FORST ein.

Kehren wir nun nochmals zu der eingangs erhobenen Frage nach der Bildung von Produkten harmonischer Räume zurück. Man sieht sofort, daß die Produkthalbgruppe  $(\mu_t \otimes \mu'_t)_{t>0}$  auf  $G \times G'$  die Eigenschaften (i) und (ii) besitzt, wenn zwei vorgegebene Faltungshalbgruppen  $(\mu_t)_{t>0}$

und  $(\mu'_t)_{t>0}$  auf den Gruppen  $G$  bzw.  $G'$  diese Eigenschaften besitzen. Schwierigkeiten bereitet die Eigenschaft (iii).

Wir werden aber selbst in einem relativ krassen Fall sehen, daß sich auch die Eigenschaft (iii) durch Zusatzbedingungen erhalten läßt. Es wird sich um den Fall eines unendlichen Produktes handeln.

#### 4. HARMONISCHE STRUKTUREN AUF $T^\infty$

Wir betrachten die Kreislinie  $T$ , also den eindimensionalen Torus. Auf der Charaktergruppe  $\hat{T} = \mathbf{Z}$  sind  $n \mapsto a n^2$  mit dem Normierungsfaktor  $a \geq 0$  sämtliche quadratische Formen. Jeder dieser quadratischen Formen entspricht gemäß (19) eine symmetrische Faltungshalbgruppe  $(\mu_{at})_{t>0}$  vom lokalen Typ auf  $T$ . Dabei hat  $\mu_{at}$  eine stetige Dichte bezüglich des Haar-Maßes  $\theta$  auf  $T$  (mit zu 1 normierter Gesamtmasse):

$$(20) \quad \mu_{at} = g_{at} \theta .$$

Diese Dichte ist für  $a = 1$  der Wärmekern

$$(21) \quad \begin{aligned} g_t(\theta) &= \sum_{k \in \mathbf{Z}} e^{-tn^2} e^{ik\theta} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-tn^2} \cos n\theta \\ &= \sqrt{\frac{\pi}{t}} \sum_{k \in \mathbf{Z}} \exp\left(-\frac{(\theta + 2\pi k)^2}{4t}\right) . \end{aligned}$$

$(\mu_t)_{t>0}$  ist nichts anderes als die Faltungshalbgruppe der Brownschen Bewegung auf  $T$ .

Wir betrachten nun auf dem unendlich-dimensionalen Torus  $T^\infty = \prod_{k=1}^{\infty} T_k$ , wobei jedes  $T_k$  gleich  $T$  ist, für eine zunächst beliebig gegebene Folge  $\mathcal{A} = (a_k)_{k \in \mathbf{N}}$  reeller Zahlen  $a_k > 0$  die Faltungshalbgruppe  $(\mu_t^{\mathcal{A}})_{t>0}$  mit

$$(22) \quad \mu_t^{\mathcal{A}} = \bigotimes_{k=1}^{\infty} \mu_{a_k t} .$$

Auf der Charaktergruppe  $\hat{T}^\infty = \mathbf{Z}^{(\infty)}$ , d.h. auf der direkten Summe von abzählbar unendlich vielen Kopien von  $\mathbf{Z}$ , ergibt sich die Fourier-Transformierte von  $\mu_t^{\mathcal{A}}$  zu

$$(23) \quad \hat{\mu}_t^{\mathcal{A}}(n) = e^{-tq(n)}$$

mit  $q(n) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k n_k^2$ , wobei  $n \in \mathbf{Z}^{(\infty)}$  eine Folge  $(n_k)$  ganzer Zahlen ist, von denen höchstens endlich viele  $\neq 0$  sind.  $q$  ist eine stetige quadratische Form auf  $\mathbf{Z}^{(\infty)}$ . Daher ist  $(\mu_t^{\mathcal{A}})_{t>0}$  symmetrisch und vom lokalen Typ, also die Bedingung (i) des Forstschen Satzes erfüllt. Da  $T^{\infty}$  kompakt, also die konstante Funktion 1 kompakten Träger besitzt und stets  $\mu_t^{\mathcal{A}}(1) = 1$  gilt, liegt keine transiente Halbgruppe vor. Wir gehen daher für beliebiges  $\lambda > 0$  zur Faltungshalbgruppe  $(e^{-\lambda t} \mu_t^{\mathcal{A}})_{t>0}$  über, die (i) und (ii) erfüllt. Um (iii) erfüllen zu können, setzen wir

$$(24) \quad \rho_{\lambda}^{\mathcal{A}} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} \mu_t^{\mathcal{A}} dt .$$

Nach einem bekannten Satz der harmonischen Analyse besitzt  $\mu_t^{\mathcal{A}}$  genau dann eine *stetige* Dichte  $g_t^{\mathcal{A}}$  bezüglich des Haar-Maßes  $\Theta$  von  $T^{\infty}$ , wenn

$$\sum_{n \in \mathbf{Z}^{(\infty)}} \hat{\mu}_t^{\mathcal{A}}(n) < + \infty .$$

Dies aber erweist sich als zu

$$(25) \quad \sum_{k=1}^{\infty} e^{-ta_k} < + \infty$$

äquivalent. Unter der Voraussetzung der Gültigkeit von (25) für jedes  $t > 0$  besitzt dann das Maß  $\rho_{\lambda}^{\mathcal{A}}$  die Dichte

$$(26) \quad \tilde{\rho}_{\lambda}^{\mathcal{A}} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} g_t^{\mathcal{A}} dt ,$$

welche sich als nach unten halbstetig erweist. Stets ist  $\tilde{\rho}_{\lambda}^{\mathcal{A}}(0) = + \infty$ . Von BERG [5] wurde zunächst die Bedingung

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sqrt{2^k}}{\sqrt{a_k}} < + \infty ,$$

kurze Zeit darauf von FUGLEDE (unveröffentlicht)

$$\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a_k}} < + \infty$$

und schließlich 1977 erneut von BERG [6] die Bedingung

$$(27) \quad \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{a_k} < + \infty$$

als hinreichend dafür erkannt, daß (25) für jedes  $t > 0$  gilt und  $\rho_\lambda^{\mathcal{A}}$  für jedes  $\lambda > 0$  in  $T^\infty \setminus \{0\}$  stetig und reell ist. Auf diese Weise erhielt BERG [5], [6] den Satz:

4.1 Erfüllt eine Folge  $\mathcal{A} = (a_k)_{k \in \mathbb{N}}$  positiver reeller Zahlen die Bedingung (27), so existiert auf  $T^\infty$  für jedes  $\lambda > 0$  ein translationsinvariantes, symmetrisches Garbendatum  $\mathcal{H}_\lambda^{\mathcal{A}}$ , für welches  $(T^\infty, \mathcal{H}_\lambda^{\mathcal{A}})$  ein strenger Brelot-Raum und  $\tilde{\rho}_\lambda^{\mathcal{A}}$  ein strikt positives, in  $T^\infty \setminus \{0\}$  harmonisches Potential ist.

Damit hat man mittels Produktbildung eine ganze Schar harmonischer Strukturen  $\mathcal{H}_\lambda^{\mathcal{A}}$  auf dem unendlich-dimensionalen Torus konstruiert. Jede dieser Strukturen kann durch den linearen „Differentialoperator“

$$(28) \quad L_\lambda^{\mathcal{A}} = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \frac{\partial^2}{\partial \theta_k^2} - \lambda \cdot id$$

beschrieben werden. Bezeichnet nämlich  $\pi_p: T^\infty \rightarrow T^p$  die kanonische Projektion von  $T^\infty$  auf den  $p$ -dimensionalen Torus  $T^p$  der ersten  $p = 1, 2, \dots$  Koordinaten, so liegen alle Funktionen  $f \circ \pi_p$  mit  $f \in C^2(T^p)$  im Definitionsbereich des infinitesimalen Erzeugers  $L_\lambda^{\mathcal{A}}$  von  $(\mu_t^{\mathcal{A}})_{t>0}$  und es gilt

$$L_\lambda^{\mathcal{A}} (f \circ \pi_p) = \sum_{k=1}^p a_k \frac{\partial^2 f}{\partial \theta_k^2} - \lambda f.$$

Mit distributionstheoretischen Methoden kann man, ausgehend von (28), das Garbendatum  $\mathcal{H}_\lambda^{\mathcal{A}}$  direkt beschreiben: Es bezeichne hierzu  $\mathcal{D}(\Omega)$  für offenes  $\Omega \subset T^\infty$  die Menge aller Funktionen  $f \circ \pi_p$  mit  $p \in \mathbb{N}$  und  $f \in C^\infty(T^p)$ , deren Träger in  $\Omega$  enthalten ist. Dann gilt

$$\mathcal{H}_\lambda^{\mathcal{A}}(\Omega) = \left\{ h \in C(\Omega) : \int_{T^p} h L_\lambda^{\mathcal{A}} g d\theta = 0 \text{ für alle } g \in \mathcal{D}(\Omega) \right\}.$$

Dabei kann man sogar  $\lambda = 0$  zulassen. Allerdings ist der dann entstehende Brelot-Raum nicht mehr streng. Dieser Zugang findet sich ebenfalls bei BERG [5]. Analoge Resultate wurden von BENDIKOV [4] mit Methoden der Theorie der Markov-Prozesse erzielt.

## 5. BEZIEHUNGEN ZUR DIFFERENTIATIONSTHEORIE

Über die Theorie der harmonischen Räume hinaus werden der Potentialtheorie durch die Betrachtung von Halbgruppen von Kernen neue Dimensionen eröffnet. Dies soll nun noch kurz skizziert werden.



Eine der einfachsten Faltungshalbgruppen auf  $\mathbf{R}$  ist die Halbgruppe  $(\varepsilon_{-t})_{t>0}$  der Einheitsmassen in  $-t$ . Die zugehörigen Kerne  $P_t$  operieren wie folgt

$$P_t f(x) = f(x+t).$$

Der durch Integration entstehende (Potential-) Kern  $V$  hat also die Gestalt

$$Vf(x) = \int_0^\infty P_t f(x) dt = \int_x^\infty f(t) dt.$$

Die *supermedian* genannten Funktionen bezüglich einer Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$ , d.h. diejenigen Borel-meßbaren Funktionen  $f \geq 0$  mit

$$P_t f \leq f \quad \text{für alle } t > 0,$$

sind im Falle dieser speziellen Halbgruppe gerade die monoton fallenden Funktionen  $f \geq 0$  auf  $\mathbf{R}$ . Für Lebesgue-integrierbares  $f$  auf  $\mathbf{R}$  ist  $Vf$  absolut stetig und  $\lim_{x \rightarrow +\infty} Vf(x) = 0$ . Setzen wir noch

$$D_t f = \frac{f - P_t f}{t} \quad (t > 0)$$

und

$$Df = \limsup_{t \rightarrow 0} D_t f,$$

so erhält man aus den klassischen Differentiationssätzen der Lebesgueschen Theorie:

1. Für jede supermediane Funktion  $u$  existiert der *reelle* Limes

$$(29) \quad Du = \lim_{t \rightarrow 0} D_t u \quad \text{fast überall.}$$

2. Für jede Borel-meßbare Funktion  $f \geq 0$  auf  $\mathbf{R}$  mit  $Vf(x) < +\infty$  für alle  $x \in \mathbf{R}$  gilt

$$(30) \quad DVf = f \quad \text{fast überall.}$$

Setzt man schließlich noch

$$D^* u = \sup_{t > 0} D_t u,$$

so besagt das Maximallemma von HARDY-LITTLEWOOD:

3. Für jede supermediane Funktion  $u$  gilt

$$(31) \quad V1_{\{D^* u \geq \alpha\}} \leq \frac{u(x)}{\alpha} \quad (\alpha > 0).$$



Dabei bezeichnet  $1_A$  die Indikatorfunktion einer Menge  $A$ ; die linke Seite der Ungleichung (31) ist das Lebesgue-Maß der Menge

$$\{y \in \mathbf{R}: D^* u(y) \geq \alpha\} \cap [x, +\infty[.$$

„Fast überall“ heißt stets bis auf eine Borel-Menge  $A$  vom Lebesgue-Maß Null. Hiermit äquivalent ist aber die Forderung

$$(32) \quad V 1_A(x) = 0 \quad \text{für alle } x \in \mathbf{R}.$$

Interpretiert man in den Aussagen 1 und 2 fast überall im Sinne von (32), so bekommen die Aussagen 1—3 einen Sinn für beliebige Halbgruppen  $(P_t)_{t>0}$  von Kernen auf einem Meßraum.

Es ist höchst bemerkenswert, daß die Aussagen 1—3 nahezu ohne Zusatzbedingungen für *sub-Markovsche* Halbgruppen  $(P_t)_{t>0}$  auf einem Meßraum von MOKOBODZKI [25], [26] bewiesen werden konnten. Man muß eigentlich nur voraussetzen, daß die  $\sigma$ -Algebra des Meßraumes von den exzessiven Funktionen der Halbgruppe erzeugt wird. Dies ist in unserem eingangs gewählten Beispiel der Fall.

## 6. AUSBLICK: RESOLVENTEN IN DER POTENTIALTHEORIE

Häufig — ein typisches Beispiel hierfür ist der Beweis des Satzes 2.1 — gelangt man zu einer Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$  von Kernen nur auf dem Umweg über deren *Resolvente*  $(V_\lambda)_{\lambda>0}$ , wobei  $V_\lambda$  den Kern,

$$(33) \quad V_\lambda = \int_0^\infty e^{-\lambda t} P_t dt,$$

also die Laplace-Transformierte von  $(P_t)_{t>0}$  bezeichnet. Es ist der Satz von Hille-Yosida, der von einer Resolvente, d.h. genauer von einer der Resolventengleichung

$$(34) \quad V_\lambda - V_\mu + (\lambda - \mu) V_\lambda V_\mu = 0 \quad (\lambda, \mu > 0)$$

genügenden Familie  $(V_\lambda)_{\lambda>0}$  von Kernen zu einer zugehörigen, unter geeigneten Zusatzvoraussetzungen eindeutig bestimmten Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$  von Kernen führt. (Vgl. MEYER [24].)

Außerdem ist es selbst bei gegebener Halbgruppe  $(P_t)_{t>0}$  oft nur auf dem Umweg über die Resolvente möglich, gewisse Eigenschaften nachzuweisen. Ist beispielsweise  $(P_t)_{t>0}$  eine Fellersche Halbgruppe auf einem lokal-kompakten Raum  $X$  mit abzählbarer Basis, so läßt sich die Exzessivi-

tät einer Borel-meßbaren Funktion  $u \geq 0$  auf  $X$  durch die zur Definition äquivalente Bedingung

$$(35) \quad \sup_{\lambda > 0} \lambda V_{\lambda} u = u$$

für die Resolvente nachweisen.

Dies hat zur Folge, daß der explizite Gebrauch der Halbgruppe oft unnötig und Sätze gleich in der Sprache der Resolventen formuliert und bewiesen werden können. Häufig wird hierdurch größere Allgemeinheit erzielt, nämlich dann, wenn keine zugehörige Halbgruppe existiert. Ein Beispiel sind die Sätze von MOKOBODZKI des letzten Abschnitts, welche in [25], [26] gleich in der Sprache der Resolventen formuliert werden. Auch die Untersuchungen von CORNEA-LICEA [14] sind in diesem Licht zu sehen.

Resolventen treten auch bei *hyperbolischen* linearen Differentialgleichungen zweiter Ordnung auf — allerdings muß man dabei auf die Positivität der Kerne verzichten. RITTER [27] (vgl. auch [16]) hat nämlich gezeigt, daß für große Klassen solcher Differentialgleichungen der durch die Fundamentallösung definierte Kern in eine Resolvente reeller Kerne aufgelöst werden kann. Hierdurch dürfte es möglich werden, potentialtheoretische Methoden auch in das Gebiet der hyperbolischen Differentialgleichungen eindringen zu lassen. Das Gebiet der parabolischen Differentialgleichungen wurde potentialtheoretischen Methoden bereits durch den allgemeinen Begriff des harmonischen Raumes erschlossen (vgl. [1] und [13]).

#### LITERATUR

- [1] BAUER, H. *Harmonische Räume und ihre Potentialtheorie*. Lecture Notes in Math. 22, Springer-Verlag (1966).
- [2] ——— Aspects of modern potential theory. *Proc. Intern. Congress of Math., Vancouver 1974*, pp. 327-337 (1975).
- [3] ——— *Wahrscheinlichkeitstheorie und Grundzüge der Masstheorie*. 3. Aufl. Verlag W. de Gruyter, Berlin (1978).
- [4] BENDIKOV, A. D. On functions that are harmonic for a certain class of diffusion processes on a group. *Theory Probability Appl.* 20 (4), pp. 759-769 (1975).
- [5] BERG, C. Potential theory on the infinite dimensional torus. *Inventiones math.* 32 (1976), pp. 49-100.
- [6] ——— On Brownian and Poissonian convolution semigroups on the infinite dimensional torus. *Inventiones math.* 38 (1977), pp. 227-235.
- [7] BERG, C. and G. FORST. *Potential theory on locally compact abelian groups*. Ergebnisse der Math. 87, Springer-Verlag (1975).
- [8] BLIEDTNER, J. Harmonische Gruppen und Huntsche Faltungskerne (in Seminar über Potentialtheorie). *Lecture Notes in Math.* 69, p.p. 69-102, Springer-Verlag (1968).

- [9] BOBOC, N., C. CONSTANTINESCU and A. CORNEA. Semigroups of transitions on harmonic spaces. *Rev. Roumaine Math. Pures Appl.* 12 (1967), pp. 763-805.
- [10] BRELOT, M. *Lectures on potential theory*. Tata Inst. of Fund. Research, Bombay (1960).
- [11] ——— *Axiomatique des fonctions harmoniques*. Les Presses de l'Université de Montréal (1966).
- [12] ——— Les étapes et les aspects multiples de la théorie du potentiel. *L'Enseignement Math.* 18 (1972), pp. 1-36.
- [13] CONSTANTINESCU, C. and A. CORNEA. *Potential theory on harmonic spaces*. Grundlehren der Math. 158, Springer-Verlag (1972).
- [14] CORNEA, A. and G. LICEA. *Order and potential, resolvent families of kernels*. Lecture Notes in Math. 494, Springer-Verlag (1975).
- [15] DOOB, J. L. Semimartingales and subharmonic functions. *Trans. Amer. Math. Soc.* 77 (1954), pp. 86-121.
- [16] EDWARDS, R. E., E. HEWITT and G. RITTER. Fourier multipliers for certain spaces of functions with compact supports. *Inventiones math.* 40 (1977), pp. 37-57.
- [17] FORST, G. Symmetric harmonic groups and translation invariant Dirichlet spaces. *Inventiones math.* 18 (1972), pp. 143-182.
- [18] HANSEN, W. Konstruktion von Halbgruppen und Markoffschen Prozessen. *Inventiones math.* 3 (1967), pp. 179-214.
- [19] ——— Hunt's theorem and axiomatic potential theory. *Inventiones math.* 14 (1971), pp. 242-252.
- [20] HUNT, G. A. Markoff processes and potentials I. *Illinois J. Math.* 1 (1957), pp. 44-93.
- [21] KAKUTANI, S. Two-dimensional Brownian motion and harmonic functions. *Proc. Imp. Acad. Tokyo* 20 (1944), pp. 706-714.
- [22] ——— Markov processes and the Dirichlet problem. *Proc. Imp. Acad. Tokyo* 21 (1945), pp. 227-233.
- [23] MEYER, P. A. BreLOT's axiomatic potential theory of the Dirichlet problem and Hunt's theory. *Ann. Inst. Fourier* 13, fasc. 2 (1963), pp. 357-372.
- [24] ——— *Probabilités et potentiels*. Hermann, Paris (1966).
- [25] MOKOBODZKI, G. Densité relative de deux potentiels comparables (in: Séminaire de Probabilités IV). *Lecture Notes in Math.* 124, pp. 170-194, Springer-Verlag (1970).
- [26] ——— Quelques propriétés remarquables des opérateurs positifs (in Séminaire de Probabilités IV). *Lecture Notes in Math.* 124, pp. 195-207, Springer-Verlag (1970).
- [27] RITTER, G. Konstruktion von Operatoren und Kernen mit Hilfe von Absorptionsmengen. *Math. Ann.* 216 (1975), pp. 51-66.
- [28] SCHIRMEIER, U. Produkte harmonischer Räume. *Sitz. Ber. math. nat. Kl. Bayer. Akad. Wiss.* 1978 (1979), pp. 5-22.

(Reçu le 3 octobre 1978)

Heinz Bauer

Mathematisches Institut  
der Universität Erlangen-Nürnberg  
Bismarckstr. 1 1/2  
D-8520 Erlangen  
Bundesrepublik Deutschland