

Aufgrund spezifischer Vorteile werden für Freiluftanwendungen in der Mittelspannungs- und Hochspannungstechnik zunehmend Kunststoffisolatoren eingesetzt. Der vorliegende Beitrag geht den Gründen nach und verweist auf Unterschiede zwischen polymeren und keramischen Isolierstoffoberflächen bei simultaner Spannungs- und Fremdschichtbelastung. Er stellt Modelle zur Beschreibung des Isoliervermögens von Kunststoffisolatoren vor und präsentiert entsprechende Ergebnisse aus Freiluft- und Laborversuchen.

# Kunststoffisolatoren als Alternative

Zum Isoliervermögen von Isolatoren mit polymerem Mantelwerkstoff - am Beispiel von Silikongummi

■ Heinz Büchner, Frank Schmuck  
und Arturo Zanetti

Der Marktanteil von Kunststoffisolatoren für Freiluftanwendungen in der Mittel- und Hochspannungstechnik ist progressiv wachsend. Neben den mechanischen Vorteilen von Kunststoffisolierungen (Explosions-, Erdbeben- und Vandalismussicherheit) unterscheidet sich das Verhalten von vergleichbaren polymeren und keramischen Isolierstoffoberflächen bei simultaner Spannungs- und Fremdschichtbelastung wesentlich. Der folgende Beitrag beschreibt diese Unterschiede. Er stellt bestehende Modelle zur Beschreibung des Isoliervermögens vor und präsentiert auch Ergebnisse aus Freiluft- und Laborversuchen, unter anderem aus dem Bereich «Verstärkte Kunststoffe» der Cellpack AG, der seit rund 38 Jahren faserverstärkte Isolierteile<sup>1)</sup> und seit ungefähr 8 Jahren Kunststoffisolatoren<sup>2)</sup> für eine internationale Klientel in der Hochspannungsisolierertechnik produziert. Die hervorragenden Eigenschaften

von Kunststoffisolatoren widerspiegeln sich in den langjährigen positiven Betriebserfahrungen und tragen in zunehmendem Masse zur zuverlässigen Erzeugung und Verteilung von Elektroenergie bei.

## Aufbau von Kunststoffisolatoren und Eigenschaften der Materialien

### Aufbau

Der konstruktive Aufbau von Kunststoffisolatoren basiert auf Einstoff- oder Mehrstoffsystemen. Typische Isolatoren aus Einstoffsystemen bestehen heute aus Giessharz-Formstoffen, die erfolgreich bis in den Mittelspannungsbereich Anwendung finden. Charakteristisch für das Einstoffsystem ist, dass sowohl die mechanischen (Druck, Zug, Biegung) als auch die elektrischen Funktionen (Kriechweg) von *einem* Material übernommen werden.

Das Mehrstoffsystem ist durch mindestens zwei Materialkomponenten gekennzeichnet. Der klassische Verbundisolator, aus einem faserverstärkten Harzkern (Stab, Rohr) und polymeren Mantelwerkstoff bestehend, vereint verschiedene Ma-

### Adresse der Autoren

Dipl.-Ing. Heinz Büchner, Verkaufsleiter  
Dr.-Ing. Frank Schmuck, Produktlinienleiter  
und Dipl.-Ing. Arturo Zanetti, Produktlinienleiter, Cellpack AG, Verstärkte Kunststoffe  
5610 Wohlen

<sup>1)</sup> Markenname: Cevolit

<sup>2)</sup> Markenname: Cevosil

Formelzeichen	
1K-System	SR-System bestehend aus einer Komponente
2K-System	SR-System bestehend aus zwei Komponenten
$D_m$	mittlerer Durchmesser, berechnet nach (Strahldurchmesser + Schmirndurchmesser)/2
$\beta_f$	Faktor für Fremdschichtkennlinie
$n$	Anstiegsparameter
$S$	Schlagweite
$t_p$	Prüfzeit
$t_r$	Transferzeit (Zeit bis zum Erreichen hydrophober Fremdschicht-Eigenschaften)
$U_d$	Überschlagspannung
$U_{d0}$	Überschlagspannung im Neuzustand
$U_{df}$	Überschlagspannung im Zustand Filmbelag
$U_b$	Betriebsspannung
$U_s$	Prüfspannung
$U_{LL}$	Leiter-Leiter-Betriebsspannung
$\dot{u}_k$	Kriechweg
$d$	Fremdschichtdicke
$\Theta_v$	dynamischer Vorrückwinkel
$\Theta_R$	dynamischer Rückzugswinkel
$\kappa_e$	Volumenleitfähigkeit
$\kappa_N$	Nebelleitfähigkeit
$\kappa_s$	Schichtleitfähigkeit
$\kappa_{sp}$	partielle Schichtleitfähigkeit

terialien mit einer Funktionsteilung entsprechend ihrer optimalen Eignung. In diese Kategorie sind auch bestehende Freiluftisolatoren aus keramischen Werkstoffen einzuordnen, die (vor Erreichen ihrer Armortisationszeit, Lebensdauer) bei Fremdschichtproblemen zum Teil mit sogenannten Coatings (1-Komponenten-Silikonkummi-Systeme) beschichtet werden. Diese Massnahme verbessert temporär das Fremdschichtverhalten (Verringerung der Überschlagwahrscheinlich-

keit). Die mechanischen Eigenschaften der Porzellanisolierung werden nicht beeinflusst, so dass die Nachteile gegenüber der Verbundisolierung (z. B. Explosions- und Erdbebensicherheit bei Apparateisolatoren) bestehen bleiben. Verbundisolatoren werden bis in höchste Spannungsebenen eingesetzt.

**Materialeigenschaften von Kunststoffisolatoren**

Einstoffsysteme bestehen heute überwiegend aus Epoxidharz-Formstoffen. Deren Struktur ist als teilkristallin zu bezeichnen. Bei einem bestehenden System sind die mechanischen und elektrischen Eigenschaften beispielsweise über den Gehalt sowie die Art und Behandlung des Füllstoffs einstellbar. Bei Verbundisolatoren (Mehrstoffsystem) werden heute verschiedene Harzsysteme (Vinylester, Epoxidharz) verwendet. Die verstärkenden Fasern bestehen aus E-Glas (Apparate) oder optional aus ECR-Glas (Langstabisolatoren). Der Kern bildet mikroskopisch ein heterogenes System (Fasern, Interface Faser-Harzmatrix, Harzmatrix), sein Verhalten kann im elastischen Bereich als homogen modelliert werden. Die Eigenschaften von Kernwerkstoffen, verstärkt mit ungeschnittenen (sog. endlosen) Fasern, sind durch ein Strukturverhalten geprägt. Die Stäbe für Langstabisolatoren sind im allgemeinen unidirektional (in Achsrichtung) verstärkt, während die Rohre für Apparateisolatoren gemäss dem Anforderungsprofil optimiert werden (Wickelwinkel zwischen 0 und 90°).

Typische Mantelwerkstoffe für Kunststoffisolatoren in den Anwendungsfeldern Mittel- und Hochspannung sind:

- Silikonkummi SR (Hoch-Temperatur-Vernetzend HTV, Raum-Temperatur-Vernetzend RTV, Liquid Silicone Rubber LSR)
- Ethylene Propylene Rubber EPR (Ethylene Propylene Monomer EPM, Ethylene Propylene Dien-Monomer EPDM)
- Epoxidharz EP (Bisphenol, Cycloaliphat)
- Polyolefine (Polyethylen PE, vernetztes Polyethylen VPE)
- Polyurethane
- Polyfluorkarbone (Polytetrafluorethylen PTFE)

Die vorliegenden Ergebnisse aus Freiluft- und Laboruntersuchungen zeigen, dass Silikonkummi ausgezeichnete Voraussetzungen für einen Mantelwerkstoff hoher Lebensdauer zeigt [1-3]. Für die Auslegung von Isolatoren mit SR als Mantelwerkstoff sind sowohl Standard- als auch empirische Dimensionierungsregeln zu berücksichtigen - nur die Symbiose «optimales Design + hochwertiger Isolierstoff» sichert eine lange Lebensdauer!

Die Vielfalt der verfügbaren Silikonkummiarten für Anwendungen in der Freiluftisoliertechnik ist gross. Eine übliche Terminologie zur Unterscheidung ist in Bild 1 dargestellt. HTV-Systeme werden traditionell und aus Kostengründen überwiegend für Langstabisolatoren verwendet. Apparateisolatoren werden abhängig von der Technologie der Beschichtung sowohl mit HTV- als auch mit RTV-2-Komponenten-Systemen (RTV-2K-Systemen) versehen. RTV-1-Komponenten-Systeme (RTV-1K-Systeme) werden als Coatings verwendet. LSR-Systeme sind für diese Anwendung eine

	Silikonkummi-Art			
	HTV-1K <sup>1)</sup>	LSR-2K <sup>2)</sup>	RTV-2K	RTV-1K
Mischviskosität in mPas	350 000...pastös	60 000...200 000 ...350 000	18 000...65 000 ...80 000	3000
Verarbeitungstemperatur in °C	150...180...250	100...200	25...200	25
Verarbeitungs-(Topf-)Zeit bei 20 °C	> 1 Monat	> 3 Tage	einige Stunden	< 1 Stunde
chemische Grundreaktion	peroxidisch	Addition	Addition	Kondensation
Reissfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> (Reissdehnung) <sup>2)</sup>	8(600)	5(400)...6(450)	5(340)...5.5(450)	3(250)
Weiterreisswiderstand (N/mm) <sup>2)</sup>	20	20...25	25...20	6
Hydrophobieverhalten (Rückzugswinkel, Dynamik des Wiederkehrs und Transfers)	Die Eigenschaften sind über die Formulierung des Silikonkummis, die Art und Behandlung des Füllers, den Füllgrad sowie die Herstellungstechnologie einstellbar. Die Materialstärke des SR-Mantelwerkstoffes beeinflusst bei Unterschreiten eines bestimmten Wertes das Hydrophobieverhalten.			
Erosions- und Kriechspurfestigkeit				

Bild 1 Eigenschaften von SR-Arten für die Isoliertechnik im Mittel- und Hochspannungsbereich

1) mit Füller [Aluminiumtrihydrat ATH oder Kieselsäure (SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub>] angereichert, allgemein >50 Masseprozent; 2) Eigenschaften sehr stark von Vulkanisationsparametern abhängig. Die quantitative Übersicht entstand nach Informationsschriften der Firmen Bayer und Wacker.



Bild 2 Wirkung der Hydrophobie

vergleichsweise «junge» SR-Art, die hinsichtlich Eigenschaftsbild eine Mittelstellung einnehmen. Die signifikant verschiedenen Mischviskositäten sind eine Ursache für verschiedene Beschirmungstechnologien; mit steigenden Werten sinkt im allgemeinen das in einem Prozess verarbeitbare Volumen. Ein Vorteil der chemischen Grundreaktion «Addition» besteht in der Vernetzung ohne Beiprodukte. Hinsichtlich Hydrophobieverhalten und Erosions- und Kriechstromfestigkeit können sich Tendenzen mit einer gewissen Gegenläufigkeit abzeichnen. Tendenz bedeutet, dass die Materialien eigenschaftsspezifisch optimierbar sind: Die kommerziell verfügbaren Systeme in der Freiluftisoliertechnik zeigen im allgemeinen gute Eigenschaften betreffs beider Kriterien.

### Modell des Fremdschichtverhaltens von Isolatoren mit polymeren Mantelwerkstoffen

#### Überschlagspannung als Bewertungsgröße des Oberflächenzustandes

Für eine Isolierstoffoberfläche besteht bei gegebener Verschmutzung (Leitfähigkeit der elektrolytisch leitfähigen Fremdschicht) ein direkter Zusammenhang zwischen Benetzungszustand und Überschlagspannung. Polymere Mantelwerkstoffe weisen im Neuzustand eine hydrophobe Oberflächenwirkung auf, die sich in der Bildung von gegeneinander isolierten Tropfen manifestiert (Bild 2). Diese Eigenschaft ist bekanntermassen auf die niedrige Oberflächenenergie von Polymeren zurückzuführen, so dass die Wechselwirkung mit der Grenzflächenspannung des benetzenden Wassers im Vergleich zu keramischen Oberflächen

niedriger ist. Die Überschlagspannung im Neuzustand von Kunststoffisolatoren ist allgemein von folgenden Faktoren abhängig:

- hydrophobe Oberflächenwirkung des polymeren Mantelwerkstoffs
- Rauheit der Isolierstoffoberfläche
- Schirmdesign («protected parts»), Einbaulage (geneigt, horizontal, vertikal)
- Verteilung des elektrischen Feldes durch den Gesamtaufbau/Verwendungszweck (z. B. Hängeisolatoren oder Durchführungen)

Im Falle ausgeprägter Hydrophobie kann die Beeinflussung des elektrischen Grundfeldes (ungestörtes Feld im trockenen Zustand) durch einen Fremdschichtbelag auf der äusseren Grenzfläche mit kapazitivem Charakter (Tropfen-Luft-Tropfen-...-Funkenstrecken) modelliert werden und ist oft vernachlässigbar. Im Gegensatz dazu kann bei keramischen Isolierungen das elektrische Grundfeld durch einen ohmschen Belag auf der äusseren Grenzfläche signifikant beeinflusst werden.

Die Messung der Überschlagspannung (Bild 3) einer gegebenen Isolierung mit hydrophobem Mantelwerkstoff führt zu relativ hohen Werten, die abhängig von den Prüfbedingungen (Prüfkörpergeometrie, Prüfparameter) den Wertebereich der Trockenüberschlagspannung erreichen können. Die Abhängigkeit von der Volumenleitfähigkeit (Anstiegsparameter) ist vergleichsweise gering.

Im Gegensatz dazu reagieren technisch saubere keramische Oberflächen bei Befuchtung mit einer vollständigen Benetzung; es formiert sich ein Filmbelag. Dieser Filmbelag wird durch die Wechselwirkung (Adhäsion) zwischen der Grenzflächenspannung des Wassers und der höheren Grenzflächenenergie des keramischen Materials erzwungen. Eine keramische Isolierung mit vergleichbarer Geometrie zeigt daher eine signifikant niedrigere Überschlagspannung bei elektrolytischer Fremdschichtbelastung. Der Überschlagprozess bei Filmbelag entspricht dem klassischen Fremdschichtüberschlag; zwischen Überschlagspannung und integraler Schichtleitfähigkeit

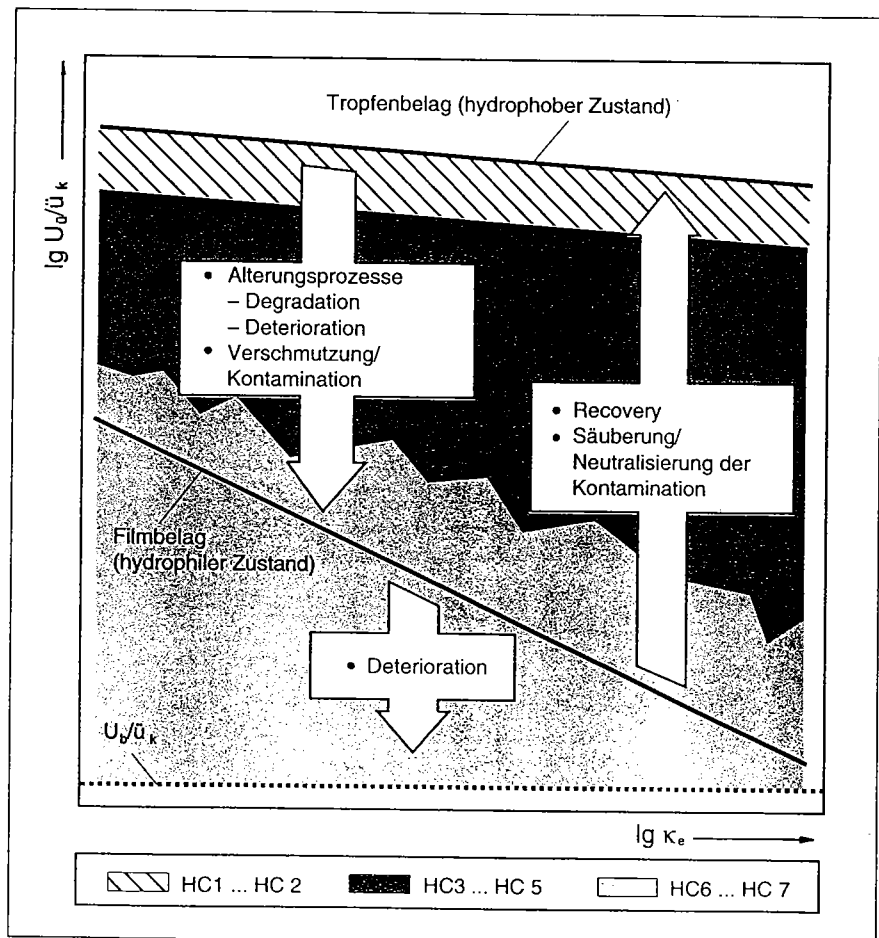


Bild 3 Beschreibung des Oberflächenzustandes mit der Überschlagspannung

$U_0 / u_k$  bezogene Überschlagspannung  
 $\kappa_e$  Volumenleitfähigkeit der Fremdschicht

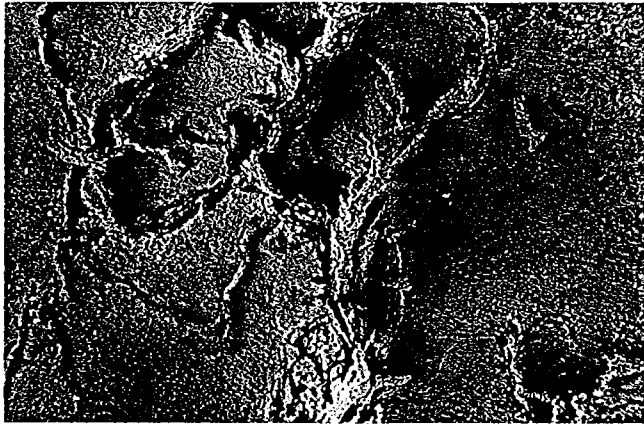


Bild 4 Grabende Erosion in einem SR-HTV

bestehen empirisch ermittelte, funktionale Zusammenhänge. Im Vergleich zum Neuzustand ist neben den kleineren Absolutwerten die Abhängigkeit vom Verschmutzungsgrad grösser (Anstiegsparameter).

Durch Veränderungen der Isolierstoffoberfläche, beispielsweise durch Alterungsprozesse, kann die Hydrophobie des Neuzustandes verlorengehen, das Isoliervermögen sinkt [4]. Mit Erreichen des Zustandes Filmbelag entsprechen die Werte der Überschlagspannung denen eines vergleichbaren Porzellan-Designs. Die Veränderungen der Isolierstoffoberfläche durch Alterungsprozesse (beispielsweise durch Korona, UV-Strahlung, Oberflächen-Teilentladungen, thermo-ionisierte Vorlichtbögen) können einen temporären Charakter (Degradation) zeigen oder von bleibender Natur (Deterioration) sein. Neben den im englischen Sprachraum gebräuchlichen Begriffen «ageing, degradation, deterioration» hat sich im deutschen Sprachraum auch die

Terminologie «reversible und irreversible Veränderung» etabliert. Unter letztgenannter ist umgangssprachlich eine «echte», da irreversible Alterung zu verstehen. Natürliche Verschmutzungen im allgemeinen wie auch Kontamination (Zersetzungsprodukte durch Korona, benetzend wirkende Radikale) können zur Absenkung des Isoliervermögens durch verminderte hydrophobe Wirkung des Mantelwerkstoffes führen und durch Reinigung bzw. Neutralisation eliminiert werden. Im Vergleich zu anderen polymeren Mantelwerkstoffen weist SR die Eigenschaft einer Erholung (Recovery) der Hydrophobie auf. Für diesen Vorgang sind zwei wesentliche Prozesse verantwortlich [5]:

- Reorientierung der hydrophob wirkenden Gruppe zur Oberfläche
- Migration/Diffusion von niedermolekularen (ölartigen) Bestandteilen in die Fremdschicht oder auf erodierte Oberflächen

Letztgenannter Prozess ist aufgrund seiner Wirkungsintensität von dominierender Relevanz. Aus der Literatur sind zum Verhalten von SR-Mantelwerkstoffen zusammenfassend folgende Ergebnisse bekannt [2]:

- Isolatoren aus SR zeigen eine höhere Hydrophobie als Mantelwerkstoffe auf der Basis von EPR,
- Isolatoren aus EPR verlieren an Hydrophobie bei obengenannten Alterungsprozessen,
- Isolatoren aus SR können an Hydrophobie bei Oberflächenentladungen verlieren, weitere Alterungsprozesse wie UV-Strahlung oder Anlagerung von Verschmutzung sind vernachlässigbar.

Zur optischen Bewertung des Ist-Zustandes der hydrophoben Oberflächenwirkung eines Kunststoffisolators wurde durch das Swedish Transmission Research Institute (STRI) ein visueller Skalierungskatalog eingeführt. Dieses vergleichsweise subjektive Verfahren erlaubt eine hinreichende qualitative Bewertung des Oberflächenzustandes, um beispielsweise die Notwendigkeit einer Reinigung der Isolatoroberfläche zu definieren. Die Abkürzung HC1 ... HC7 beschreibt die Skalierung in Hydrophobieklassen (Hydrophobicity Class); mit zunehmender Klasse sinkt der Grad der Hydrophobie.

Im Zustand des Filmbelages treten Ableitströme im mA-Bereich auf, die zu thermo-ionisierten Vorlichtbögen, in der Literatur auch als «dry band arcing» bezeichnet, führen. Stabilisiert sich ein entsprechender Vorlichtbogen örtlich (Designproblem) und zeitlich (Wechselwirkung zwischen Verschmutzungs-kategorie und Feuchtigkeitsfolge/-dauer), kann der polymere Mantelwerkstoff (aber auch Porzellan) thermisch-oxidativ zerstört werden. Typische Schadbilder sind grabende Erosion (Bild 4) und Kriechspurbildung (Tracking). SR zeigt bei einer intensiven Materialschädigung das Schadbild der grabenden Erosion, in deren Folge sich oxidiertes Material (mit hohem SiO<sub>2</sub>-Gehalt und niedrigem C-Gehalt) von der Oberfläche abhebt. Die vergleichsweise geringe Leitfähigkeit der Spuren ist ursächlich auf die SR-Struktur (-Si-O-Si-Hauptkette) zurückzuführen. Im Gegensatz dazu bilden polymere Mantelwerkstoffe mit ausgeprägter Kohlenstoffstruktur (-C-C-Hauptkette) typische Kriechspuren mit vergleichsweise hoher intrinsischer Leitfähigkeit. Diese Eigenleitfähigkeit ist unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt der umgebenden Fremdschicht und kann ab

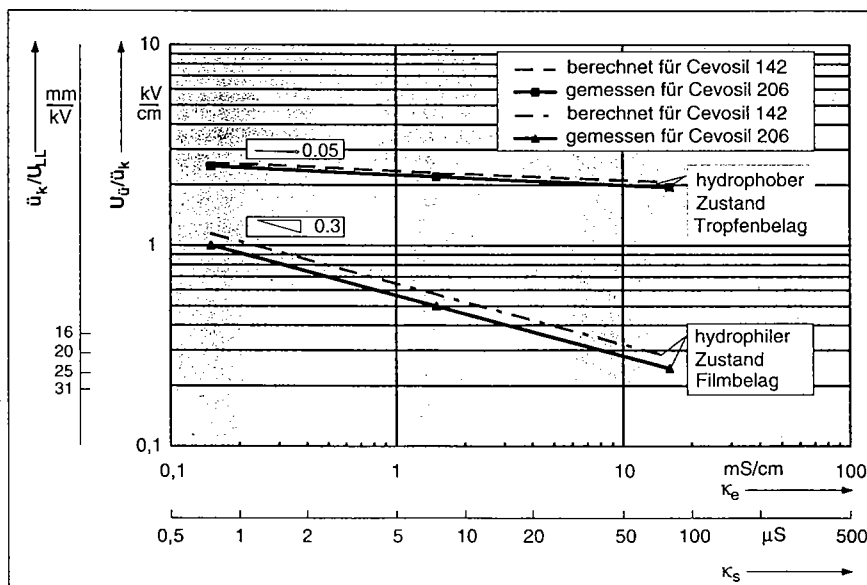


Bild 5 Überschlagspannung im Zustand des Tropfenbelages und Filmbelages

$U_k / \bar{U}_k$  bezogene Überschlagspannung  
 $\bar{U}_k / U_{LL}$  spezifischer Kriechweg nach IEC 815

$\kappa_e$  Volumenleitfähigkeit der Fremdschicht  
 $\kappa_s$  integrale (= partielle) Schichtleitfähigkeit

