

1 Kapitel: Einführung

1.1 Motivation

Der Bedarf nach effizienter Energieumwandlung in verschiedenen technischen Bereichen, wie zum Beispiel Photovoltaik, Elektromobilität, Beleuchtung u.a., hat die Entwicklung von leistungselektronischen Halbleiterbauelementen in den letzten Jahren stark vorangetrieben. Die Leistungshalbleiterbauelemente werden in einem großen Anwendungsspektrum eingesetzt, angefangen mit Netzteilen für Konsumelektronik bis zu Hochleistungsanwendungen wie die Ansteuerung von Elektromotoren [1].

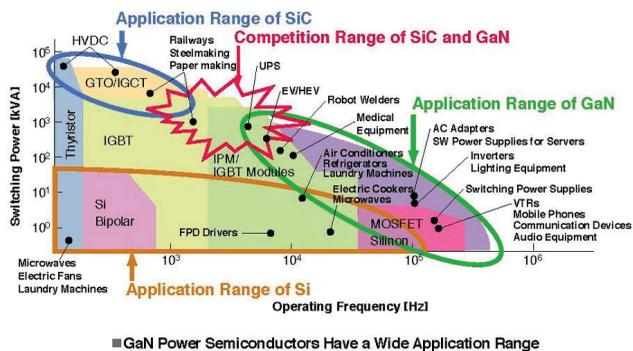


Abb. 1-1: Anwendungsbereiche für Leistungshalbleiter. Aus [1]

Die Si-basierten Halbleiterbauelemente haben bis vor kurzem den gesamten Anwendungsbereich für Leistungshalbleiter abgedeckt. Für die Anwendungen, die gleichzeitig hohe Frequenz und hohe Leistung fordern, werden heutzutage vor allem die MOSFET Transistoren (z. B. CoolMOS) eingesetzt. Durch ihren besonderen Aufbau übersteigen die CoolMOS oder Superjunction MOSFETs bereits die Materialeigenschaftengrenze von Si (s. Abb. 1-2). Dies war der Grund für einen großen kommerziellen Erfolg dieser Bauelemente. Allerdings ist dadurch auch der Weiterentwicklungspotential in Richtung höherer Leistungen bei kürzeren Schaltzeiten stark limitiert. Die Wideband Halbleiterbauelemente auf Basis von SiC und GaN eröffnen dagegen neue Möglichkeiten für noch schnellere Leistungshalbleiterbauelemente.

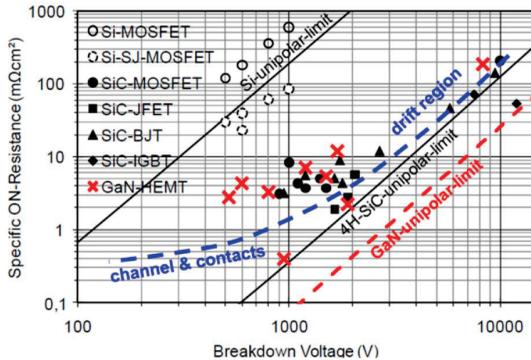


Abb. 1-2: Vergleich von spezifischem on-state Widerstand $R_{on} \times A$ vs. Durchbruchspannung U_{br} für verschiedene Leistungshalbleiterbauelemente. Die Linien zeigen das theoretische Limit für Si, SiC und GaN. Die blaue Strichlinie zeigt das technologische Limit für vertikale SiC-FETs. Aus [2].

Wie die Abb. 1-1 zeigt, wird GaN als Favorit für mittlere bis hohe Leistungen bei höheren Schaltfrequenzen gehandelt. Der Grund dafür sind die Materialeigenschaften von GaN (s. Abb. 1-3), die es ermöglichen die hocheffiziente Mikro- und Millimeterwellenleistungstransistoren zu realisieren. Gleichzeitig machen die hohe maximale Durchbruchfestigkeit, hoher maximaler Strom und potentielle hohe Betriebstemperatur es besonders interessant für die leistungselektronischen Anwendungen. Die vorteilhafte Kombination dieser Materialeigenschaften eröffnet im Anwendungsbereich der Spannungsumwandlung verschiedene Möglichkeiten für den Einsatz neuer Schaltungstopologien, die mit Si-Transistoren bisher nicht realisierbar waren. Untersuchungen zeigen, dass speziell durch die Anwendung in DC-DC-Konvertern GaN-Transistoren hohes Potential zur Steigerung der Effizienz von Energieumwandlung zeigten[3].

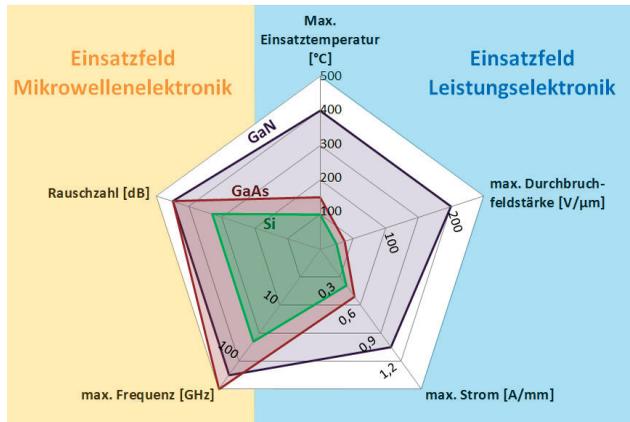


Abb. 1-3: Charakteristischen Materialeigenschaften von GaN im Vergleich zu GaAs und Si.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

GaN-Transistoren wurden anfangs vorwiegend für Hochfrequenzanwendungen entwickelt. Die GaN-basierten kompakten Chips mit einer hohen Leistungsdichte sind jedoch auch für Leistungsbaulemente extrem interessant, da sie die Transistoren mit gleichzeitig hoher Spannungsfestigkeit und geringem Einschaltwiderstand ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit sollten Designkriterien entwickelt und getestet werden, die den speziellen Anforderungen der leistungselektronischen Anwendungen gerecht werden.

Der Aufbau der Arbeit wird im Folgenden beschrieben.

Im **Kapitel 2** wird eine Übersicht über die Grundlagen der AlGaIn/GaN HEMTs gegeben. Nach der Einführung in die Materialeigenschaften von GaN und die physikalischen Eigenschaften der epitaktischen HEMT-Struktur, werden Aufbau und wichtige Kenngrößen der AlGaIn/GaN HEMTs diskutiert.

Im **Kapitel 3** wird das Konzept für Design-Optimierung vorgestellt. Dafür werden die durch Anwendungsbereich gegebenen Randbedingungen, sowie potentielle Optimierungsmaßnahmen ausführlich diskutiert.

Das **Kapitel 4** gibt einen Überblick über die Herstellungstechnologie und Charakterisierung der AlGaIn/GaN HEMT am FBH.

Das **Kapitel 5** befasst sich mit der Optimierung der AlGaIn/GaN HEMTs für hohe off-state Durchbruchspannung. Nach einer theoretischen Einführung werden die Leckströme im Bauelement diskutiert und bewertet. Eine umfassende Studie der vertikalen Leckströme durch die epitaxialen Strukturen mit der Variation mehrerer Parameter ergibt sich aus dieser Diskussion. Basierend auf der Untersuchung der vertikalen Leckströme, werden Anforderungen an das Design der Transistorperipherie formuliert. Zum Schluss wird ein optimiertes Designvorschlag vorgestellt und praktisch bewertet.

Das **Kapitel 6** befasst sich mit der Optimierung der AlGaN/GaN HEMTs für niedrigen on-state Widerstand und hohe Stromtragfähigkeit. Thermischer Einfluss auf die on-state Transistorkenngrößen steht dabei im Fokus der Untersuchungen. Anhand einer Designstudie wird die thermische Beeinflussung des R_{on} in Abhängigkeit von der geometrischen Auslegung des Bauelements bewertet. Die Designoptimierungsvorschläge werden diskutiert.

Im **Kapitel 7** wird ein für leistungselektronische Anwendungen optimiertes Transistordesign vorgestellt. Die LE-Transistoren werden umfassend charakterisiert und das optimierte Transistordesign wird bewertet.

Im **Kapitel 8** werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick wird gegeben.

2 Kapitel: Grundlagen der AlGaN/GaN-HEMTs

2.1 *Materialeigenschaften von GaN und AlGaN/GaN Heterostruktur*

GaN gehört zu den Verbindungshalbleitern mit der breiten Bandlücke der neben dem SiC als Nachfolger für die Si-basierte Halbleiterbauelemente für zukünftige Leistungselektronikanwendungen gehandelt werden. Der Grund dafür sind die herausragende Materialeigenschaften, wie zum Beispiel hohe Elektronenbeweglichkeit μ und Sättigungsgeschwindigkeit v_{sat} kombiniert mit der hohen Durchbruchfeldstärke E_{crit} .

Der Vorteil von GaN gegenüber den anderen Halbleitermaterialien lässt sich am besten durch den Vergleich von spezifischen Kennzahlen wie z. B. *Baliga's Figure of Merit (BFOM)* (F 2.1) und *Baliga's High Frequency Figure of Merit (BHFFOM)* (F 2.2) darstellen (s. Tab. 2-1)[4]. Dabei eignet sich *BFOM* besonders gut, um das Potential eines Halbleiters bzgl. ohmscher Verluste und die *BHFFOM* bzgl. Schaltverluste für die Leistungselektronikanwendungen zu bewerten. Diese Kennzahlen berücksichtigen sowohl die kritische Feldstärke, sprich maximale Durchbruchfestigkeit im off-state, als auch die Elektronenbeweglichkeit, also die Transporteigenschaften (on-state) im ohmschen Bereich des Kennlinienfeldes (s. auch Kapitel 2.2.3.1), welche das on-state Widerstand R_{on} bestimmen.

Tab. 2-1: Vergleich der wichtigen Materialeigenschaften von verschiedenen Halbleitern [5]

Materialeigenschaft	Si	4H-SiC	GaN (epi)	GaN (bulk)
Bandlücke E_g [eV]	1,12 ind	3,26 ind.	3,42 dir.	3,42 dir.
Dielektrizitätskonstante ϵ_r	11,9	10,1	9	9
Elektronenbeweglichkeit μ [cm^2/Vs]	1350	900	1150/2000*	1150/2000*
Sättigungsgeschwindigkeit v_{sat} [$\times 10^7$ cm/s]	1,0	2,0	3,0	3,0
el. Durchbruchfeldstärke E_{crit} [$\times 10^6$ V/cm]	0,3	2,2	2,0	3,3
BFOM (relativ)	1	223	190/330*	850/1480*
BHFFOM (relativ)	1	45	36/63*	98/170*

* im 2DEG

$$BFOM = \epsilon_r \mu E_{crit}^3 \quad (\text{F 2.1})$$

$$BHFFOM = \mu E_{crit}^2 \quad (\text{F 2.2})$$

Zusätzlich zu außergewöhnlichen elektrischen Materialeigenschaften weist GaN auch sehr hohe thermische Stabilität und ist strahlungsbeständig. Dies ermöglicht den Einsatz sowohl bei hohen Umgebungstemperaturen als auch in einer strahlungsbelasteten Umgebung, wie zum Beispiel in der Raumfahrt.

2.1.1 GaN Kristallstruktur und ihre Eigenschaften

GaN gehört zu der Gruppe der III-V-Halbleitermaterialien und bildet sich in einem Wurtzit, Zinkblende oder Steinsalz Kristallgitterstruktur aus. Die Wurtzitstruktur zeichnet sich durch fehlende Achsen- oder Punktsymmetrie aus und wird durch die Gitterkonstanten a_0 und c_0 beschrieben. Die (100)-Oberfläche ist mit Ga-Atomen terminiert (Ga-face) während die (-100)-Oberfläche mit N-Atomen terminiert ist (N-face) (s. Abb. 2-1). Die technisch wichtigere Konfiguration ist dabei die Ga-terminierte Oberfläche.

Die hohe Elektronennegativität des N-Atoms ($\chi_N = 3,04$) gegenüber der Elektronennegativität des Ga-Atoms ($\chi_N = 1,81$) führt zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Ladungsträger in der Metall-Stickstoffbindung und damit zu einer erhöhten Konzentration der Elektronen am N-Atom. Das führt seinerseits zu Ausbildung von Dipolen und somit einer spontanen Polarisation ($\overrightarrow{P_{SP}}$) entlang der [0001]-Achse. Die Richtung von P_{SP} ist dabei bei Ga-reicher und N-reicher Oberfläche unterschiedlich (s. Abb. 2-1).

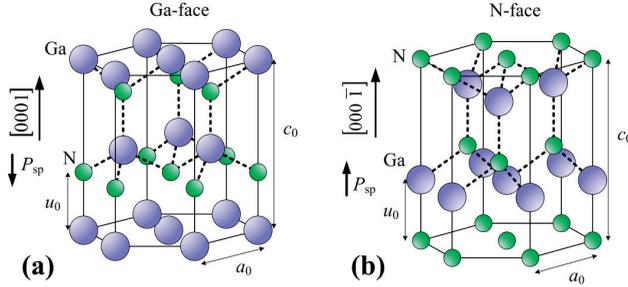


Abb. 2-1: GaN-Kristallgitterstruktur mit a) Ga-reicher und b) N-reicher Oberfläche. Aus [6]

Die Polarisierungseffekte im GaN sind eine wichtige Grundlage für die Funktion eines AlGaN/GaN HEMTs. Wenn ein GaN-Kristallgitter mechanisch verspannt wird, tritt zusätzlich zur spontanen eine piezoelektrische Polarisation (\vec{P}_{PE}) auf. Die Gesamtpolarisation setzt sich dann aus der Summe der beiden Polarisationen zusammen (F 2.3):

$$\vec{P}_{tot} = \vec{P}_{SP} + \vec{P}_{PE} \quad (\text{F 2.3})$$

So kann, je nach Richtung der mechanischen Verspannung, die totale Polarisation entweder vergrößert oder verkleinert werden. Das Zusammenwirken von spontaner und piezoelektrischer Polarisation wird in Abschnitt 2.1.2 näher erläutert.

2.1.2 2DEG in der AlGaN/GaN Heterostruktur

2.1.2.1 Polarisierungseffekte und 2DEG

In einer AlGaN/GaN Heterostruktur wird immer eine innere mechanische Spannung im Kristallgitter aufgrund der unterschiedlichen Gitterkonstanten von GaN und AlGaN erzeugt. Da das Al-Atom kleiner als das Ga-Atom ist, hat unverspanntes AlGaN eine kleinere Gitterkonstante als GaN. Aus diesem Grund wächst AlGaN unter Zugspannung auf dem GaN auf, wobei die Verspannung mit zunehmendem Al-Anteil immer größer wird. Die Verspannung führt zu einer piezoelektrischen Polarisation, die die spontane Polarisation zusätzlich erhöht. Die Kombination von AlGaN und GaN zu einer Heterostruktur führt zu einer Bandverbiegung an der Grenzfläche. Diese entsteht durch die Angleichung der Fermi-Niveaus der beiden Strukturen im thermischen Gleichgewicht. Als Folge bildet sich an der Grenzfläche ein Potentialtopf aus (s. Abb. 2-2, rechts). Da der Potentialtopf unter dem Fermi-Niveau des Leitungsbandes liegt, wird dieser mit Elektronen besetzt. Ein Kanal mit so genanntem 2-dimensionalem Elektronengas (2DEG) bildet sich aus. Die Formierung von 2DEG ist eine besondere Eigenschaft einer HEMT (High Electron Mobility Transistor) Struktur. Infolge der reduzierten Coulomb'schen Streuung haben die Elektronen im Kanal eine stark erhöhte Beweglichkeit.

In AlGaN/GaN HEMTs sind die Polarisationsladungseffekte an der AlGaN/GaN-Grenzfläche für die Herkunft der Elektronen im 2DEG zuständig, so dass die zusätzliche Dotierung nicht erforderlich ist.

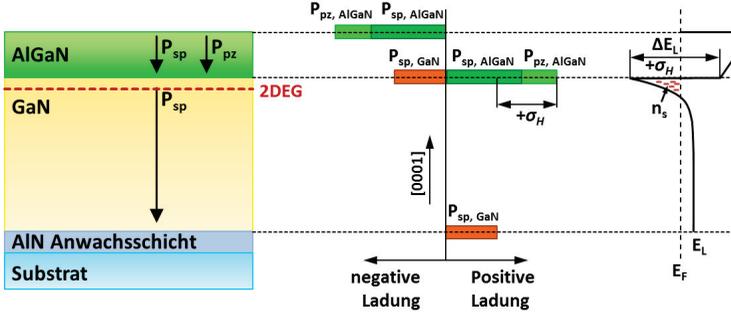


Abb. 2-2: Schematische Darstellung der AlGaN/GaN-Heterostruktur mit Polarisation und Banddiagramm

Die reale AlGaN/GaN HEMT Heterostruktur besteht aus einer einige Mikrometer dicken GaN-Schicht, auf der eine dünne (typischerweise kleiner 30 nm) AlGaN-Schicht epitaktisch aufgewachsen wird (s. Abb. 2-2, links). Die Anwachsschicht wird genutzt, um die unterschiedlichen Gitterkonstanten von GaN und Substrat auszugleichen. Dadurch und durch ihre Dicke wächst die GaN-Schicht praktisch unverspannt auf. Somit weist die GaN-Schicht nur die spontane Polarisation auf, welche an den Grenzflächen zu Flächenladungen führt.

Die Differenz der Gitterkonstanten von GaN und AlGaN führt dagegen zu einer Zugverspannung in der dünnen AlGaN-Schicht. In Abhängigkeit von der Al-Konzentration x verändert sich die Gitterkonstante a wie folgt:

$$a(x) = (-0,077x + 3,189)10^{-10}m \quad (\text{F } 2.4)$$

Dies führt zu einer zusätzlichen piezoelektrischen Polarisation in der AlGaN-Barriere, welche zusammen mit der Differenz der spontanen Polarisationen beider Materialien zu der Grenzflächenladung σ_H an der AlGaN/GaN-Grenzfläche beiträgt (s. Abb. 2-2, mittig). Diese wird gegeben durch:

$$\begin{aligned} \sigma_H &= \vec{P}_{(\text{obere Schicht})} - \vec{P}_{(\text{untere Schicht})} \\ &= \{ \vec{P}_{sp(\text{obere Schicht})} + \vec{P}_{pe(\text{obere Schicht})} \} \\ &\quad - \{ \vec{P}_{sp(\text{untere Schicht})} + \vec{P}_{pe(\text{untere Schicht})} \} \end{aligned} \quad (\text{F } 2.5)$$

Diese ortsfeste positive Ladung wird mit der negativen Ladung aus freien Elektronen (2DEG) kompensiert.

Ladungsträgerdichte

Die maximale Ladungsträgerdichte n_s im 2DEG wird in Abhängigkeit von Al-Konzentration wie folgt berechnet[7]:

$$n_s(x) = \frac{\sigma(x)}{e} - \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon(x)}{d_{AlGaN} e^2} \right) [e\phi_b(x) + E_F(x) - \Delta E_C(x)] \quad (\text{F } 2.6)$$

Dabei ist $\sigma(x)$ die Polarisationsflächenladung an der AlGaN/GaN Grenzfläche, e Elementarladung, ϵ_0 die Permittivität im Vakuum, ϵ die relative Permittivität des AlGaN, d_{AlGaN} Dicke der AlGaN Barriere, ϕ_b die Schottky Barriere, E_F die Höhe des Fermilevels und ΔE_C der Leitungsbandversatz an der Grenzfläche. Die Ladungsträgerdichte ist eine wichtige Größe für Transistor, da sie die maximale Stromdichte im Transistor bestimmt. Wie es aus der Gleichung (F 2.6) hervorgeht, ist n_s von der Al-Konzentration, aber auch von der AlGaN-Schichtdicke abhängig (s. Abb. 2-3). Mit der steigender AlGaN-Dicke und der Al-Konzentration steigt auch die Ladungsträgerdichte, wobei das Maximum je nach Al-Konzentration bei 10-20 nm erreicht wird.

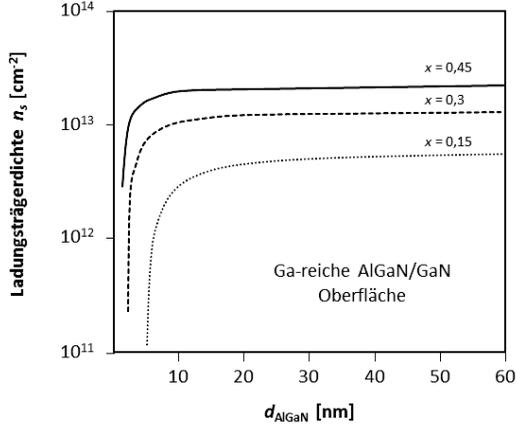


Abb. 2-3: Die Abhängigkeit der Flächenladungsdichte n_s von der Dicke der AlGaN-Schicht d_{AlGaN} für variierende Al-Konzentration (15, 30 und 45 %). Nach Vorlage [8].

Schwellspannung U_{th}

Die Schwellspannung U_{th} einer AlGaN/GaN Heterostruktur kann vereinfacht mithilfe eines Plattenkondensatormodells berechnet werden [9]. Dabei wird die Oberfläche und 2DEG als Plattenkondensator mit der Oberflächenladung σ_{surf} nach (F 2.7) angenommen.

$$\sigma_{surf} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \Delta U_{AlGaN}}{e d_{AlGaN}} \quad (F 2.7)$$

Mit $\Delta U_{AlGaN} = \phi_b + E_F(x) - \Delta E_C$ ergibt sich für U_{th} :

$$U_{th} = \frac{-e}{\epsilon_0 \epsilon_r(x)} n_s(x) d \quad (F 2.8)$$

2.1.2.2 Transporteigenschaften in einer AlGaIn/GaN HEMT Struktur

Die Elektronen im Potentialtopf haben aufgrund einer reduzierten Coulomb'schen Streuung eine sehr hohe Elektronenbeweglichkeit μ und können sich dort mit einer hohen Ladungsträgergeschwindigkeit \vec{v} bewegen. Neben der Ladungsträgerdichte gehören die beiden Parameter zu den wichtigsten Materialeigenschaften einer Halbleiterstruktur, die im Allgemeinen den Ladungsträgertransport im elektrischen Feld \vec{E} , wie folgt, beschreiben:

$$\vec{v} = -\mu\vec{E} \quad (\text{F 2.9})$$

Elektronenbeweglichkeit

Die Beweglichkeit der Elektronen im Vollmaterial und im 2DEG ist abhängig von der Temperatur und wird bestimmt durch akustische und optische Phononenstreuung, Streuung an den Hintergrundverunreinigungen und Oberflächendonatoren, Schraubversetzungen sowie Legierungsstreuung [10]. Dabei übersteigt die Elektronenbeweglichkeit im 2DEG um ein Vielfaches die Elektronenbeweglichkeit im Vollmaterial. Die Abb. 2-4 zeigt Elektronenbeweglichkeit im GaN in Abhängigkeit von der Temperatur für Vollmaterial und 2DEG.

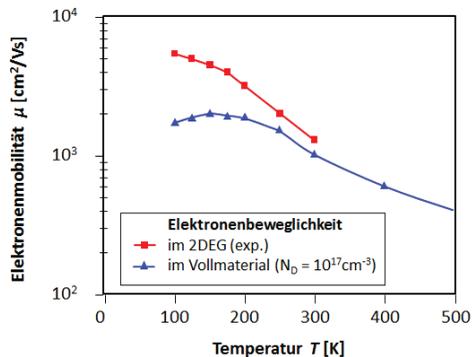


Abb. 2-4: Elektronenbeweglichkeit im GaN in Abhängigkeit von der Temperatur für Vollmaterial und 2DEG. Nach Vorlage [10].

Ladungsträgergeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Ladungsträger im 2DEG hängt von der Elektronenbeweglichkeit und dem elektrischen Feld ab (F 2.9). Die Abb. 2-5 zeigt den typischen Verlauf der Elektronenbeweglichkeit in Abhängigkeit von elektrischem Feld. Bei RT steigt v bei kleiner Feldstärke fast linear an, bis die maximale Elektronengeschwindigkeit von $3,1 \times 10^7$ cm/s bei der Feldstärke von 150 kV/cm erreicht wird [10]. Beim weiteren Anstieg der E steigt v nicht mehr an, sondern nimmt ab. Dieser Bereich der Kennlinie wird als Sättigungsbereich und die maximale Geschwindigkeit als Sättigungsgeschwindigkeit v_{sat} bezeichnet. Einen zusätzlichen Einfluss auf die Elektronengeschwindigkeit