

# Steigerung der Energieeffizienz einer integrierten Heimnetzwerkinfrastruktur

Falk-Moritz Schaefer, Armin Wulf, Rüdiger Kays  
 Lehrstuhl für Kommunikationstechnik, TU Dortmund  
 {falk.schaefer | armin.wulf | ruediger.kays}@tu-dortmund.de

## Kurzfassung

Zur Realisierung von Applikationen aus den Bereichen Smart Home, Ambient Assisted Living und E-Health ist es notwendig, eine Vielzahl von kleinen ressourcenbeschränkten Systemen zu vernetzen. Dazu eignen sich drahtlose Kommunikationslösungen mit niedrigen Datenraten und energiesparender Arbeitsweise. Damit erhalten neben den bereits weitverbreiteten hochratigen Technologien, wie WLAN, PLC und Ethernet, niederratige Kommunikationstechnologien Einzug in den Heimbereich. Eine intelligente Kombination und Interaktion zwischen beiden Netzwerken verspricht vielfältige Vorteile. Wenn z.B. zunehmend Switches, Access Points oder Mediengeräte mit niederratigen Schnittstellen ausgestattet werden, erhalten diese nicht nur Zugriff auf Heimautomatisierungsgeräte, sondern können auch über diese energiesparende Schnittstelle untereinander kommunizieren. Ein solches dediziertes Signalisierungsnetzwerk kann dazu dienen, das hochratige Netzwerk zu parametrisieren. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das über die niederratige Technologie Informationen über benötigte und nicht benötigte hochratige Schnittstellen austauscht. Unbenutzte Schnittstellen werden gezielt abgeschaltet. Mit Hilfe von Simulationen wird gezeigt, dass solche Verfahren erhebliche Energieeinsparungen der Heimnetzwerkinfrastruktur ermöglichen.

## 1. Einleitung

Im Heimbereich findet eine zunehmende Anzahl netzwerkfähiger Geräte Verwendung. Viele Multimediageräte verfügen über mehrere Schnittstellen zu verschiedenen Übertragungstechnologien, darunter WLAN, Ethernet und Powerline. Hinzu kommen Geräte, die zur Errichtung einer Heimnetzwerkinfrastruktur notwendig sind, z.B. WLAN Access Points, Switches und PLC/WLAN/Ethernet Bridges. Diese Geräte aus den Bereichen der Konsumerelektronik, Telekommunikation und der Computertechnik werden mit Hilfe von IP vernetzt und können hersteller- und produktübergreifend kommunizieren. Um anspruchsvolle Anwendungsanforderungen von z.B. Live-Streaming- und Cloud-Diensten im gesamten Heimbereich zu erfüllen, ist es jedoch notwendig sämtliche Verbindungen und Technologien intelligent zu nutzen. So kann die vorhandene Infrastruktur (z.B. vorhandene Ethernet-Verkabelung) optimal ausgenutzt werden und bei Bedarf durch Powerline oder WLAN Verbindungen ergänzt werden. Es wird möglich, immer den effizientesten Übertragungsweg über mehrere Zwischenknoten hinweg zu wählen, sodass freie Ressourcen für andere Übertragungen zur Verfügung stehen. Ein solches Netzwerk wird im Folgenden als ein hochratiges, hybrides lokales Netzwerk (hLAN) bezeichnet. Ansätze zur Realisierung eines solchen Netzwerks sind bereits im Laborstadium ([1], [2]), und die Standardisierungsgruppe IEEE P1905.1 hat sich zum Ziel gesetzt, einen Standard für „Convergent Digital Home Networks“ zu entwickeln. Mit der Diskussion um das Smart Grid erhält auch die Debatte um Anwendungsgebiete des Smart Home neue Beachtung. Zur Realisierung von Applikationen aus dem Bereich der Gebäude- und Hausautomatisierung, des Ambient Assisted Living und eHealth ist es notwendig, eine Vielzahl von kleinen und ressourcenbeschränkten Geräten



**Bild 1** Smart Home mit hLAN und HAN

zu vernetzen. Dafür eignet sich eine niederratige Übertragungstechnologie, mit Hilfe derer ein Heimautomatisierungsnetz (HAN) gebildet werden kann. Es existiert eine Vielzahl von Übertragungssystemen für diesen Zweck, von denen jedes besondere Vor- und Nachteile aufweist. Welche Systeme sich durchsetzen werden ist noch unklar. Auch ist eine Vereinheitlichung wie sie im Bereich der hochratigen Technologien stattfindet nicht absehbar. In Bild 1 sind Geräte des hLAN grün unterlegt und Geräte des HAN sind blau gekennzeichnet. Um die Kommunikationsfähigkeit zwischen HAN und hLAN herzustellen, werden vermittelnde Geräte zwischen beiden Netzwerkwelten benötigt. Mindestens ein Gerät des hLAN benötigt also eine Schnittstelle zum HAN bzw. eine Schnittstelle zu jeder HAN-Technologie. Gerade bei drahtlosen HAN-Technologien erscheint es sinnvoll, mehrere hLAN-

Geräte mit HAN-Schnittstellen auszustatten, um die Reichweite und Zuverlässigkeit des HAN zu erhöhen. Wenn wichtige hLAN-Geräte mit HAN Schnittstellen ausgestattet sind, entstehen neue Kommunikationsverbindungen. Diese sind verglichen mit den hochdatenratigen Verbindungen sehr ressourcensparend, sodass sich deren Nutzung auch durch das hLAN selbst anbietet. Die hohe Anzahl aktivierter Netzwerkschnittstellen im hLAN führt ist mit einem hohem Energieverbrauch verbunden. Die Nutzung des HAN als Signalisierungsnetzwerk zur Konfiguration des hLAN verspricht hier die Möglichkeit Energie einzusparen [8]. Nicht genutzte hochratige Schnittstellen können ausgeschaltet werden und können bei Bedarf über das HAN wieder aktiviert werden.

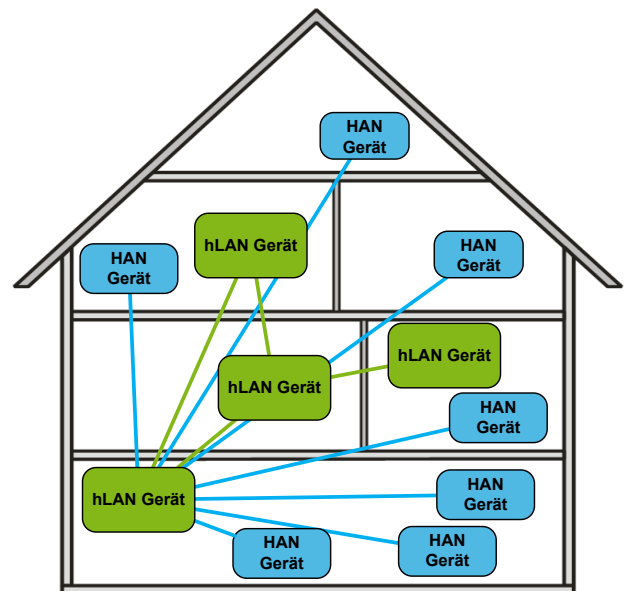
## 2. Architektur der Netzwerkinfrastruktur

### 2.1. Integration

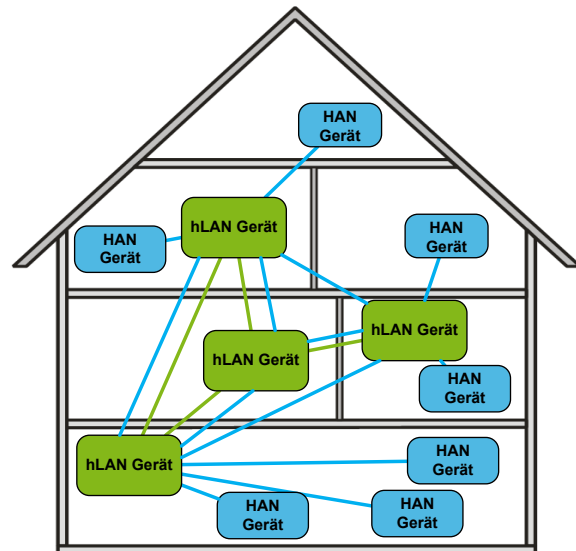
Die Integration von HAN und hLAN wird auf verschiedenen Ebenen stattfinden [4]. Auf Applikationsebene wird eine Middleware den Zugriff auf Dienste und Ressourcen vereinheitlichen. Overlay-Techniken [5] werden helfen, den physikalischen vom logischen Zugangspunkt zum HAN zu entkoppeln. Darüber hinaus werden Bridging-Techniken wie IEEE P1905.1 die Interaktion unterschiedlicher Technologien unterhalb von IP weiter voran-treiben. Mit Hilfe der Techniken von 6LoWPAN [6] wird ein einheitliches Adressierungsschema für sämtliche Geräte im Heimbereich realisierbar. So wird es möglich, ein intelligentes, technologieübergreifendes Netzwerk zu erstellen, das auch niederratige Technologien einschließt. Den höheren Schichten kann ein homogenes Netzwerk präsentiert werden. Ohne zusätzlichen Aufwand können Dienste über heterogene Technologien sämtliche Ressourcen im Netzwerk nutzen, unabhängig davon, ob diese nun durch ein HAN-Gerät mit niederratiger Funktechnologie oder durch ein hLAN-Gerät mit hochratigem Anschluss bereitgestellt werden.

### 2.2. Interaktion

Eine enge Interaktion des HAN mit dem hLAN bietet vielfältige Vorteile [4]. Neben der Steigerung der Nutzerfreundlichkeit durch eine einheitliche Darstellung der Geräte erhöht sich die Abdeckung und die Zuverlässigkeit des Netzwerks. HAN Technologien profitieren davon, wenn Ethernet-, PLC- oder WLAN-Verbindungen auch zum Austausch von Automatisierungsdaten genutzt werden. Bild 2 zeigt die herkömmliche Architektur mit einem einzigen Gateway. Es existiert immer nur eine einzige Verbindung zwischen hLAN und HAN. So muss z.B. eine Funkverbindung zum HAN-Gerät auf dem Dachboden drei Decken durchdringen. In Bild 3 hingegen sind alle hLAN Geräte mit einer HAN Schnittstelle ausgestattet. Nun existieren mehrere Verbindungen zwischen hLAN und HAN. Die Funkverbindung muss nur noch eine Decke durchdringen. Zuverlässigkeit, Reichweite und Effizienz des Netzwerks können so gesteigert werden.

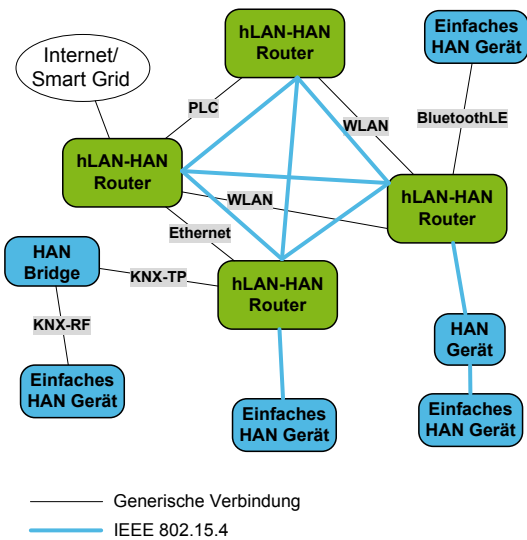


**Bild 2** Topologie eines Beispielnetzwerks mit herkömmlicher Single-Gateway-Lösung



**Bild 3** Topologie eines Beispielnetzwerks mit mehreren hLAN-Geräte mit HAN-Schnittstelle

Erkennbar ist auch, dass zusätzliche Verbindungen zwischen hLAN Geräten entstehen. Eine mögliche Topologie eines Beispielnetzwerks ist in Bild 4 dargestellt. Ein Pulsmesser kann über BluetoothLE mit dem Smart Phone kommunizieren, welches wiederum über WLAN mit dem Heimrouter verbunden ist. Auch können z.B. mit einer Fernbedienung, die mit IEEE 802.15.4 kommuniziert, die Rollläden im zweiten Stock, die nur über KNX-RF und einer KNX-IP Bridge angesprochen werden können, bedient werden. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die IEEE 802.15.4 Verbindungen zwischen den hLAN-Geräten zur Parametrisierung des hochratigen Netzwerks genutzt werden können. Die Spektrumsbelegung kann ausgehandelt werden, simple Discovery-Dienste können betrieben werden oder die Geräte verständigen sich über nicht benötigte Schnittstellen.

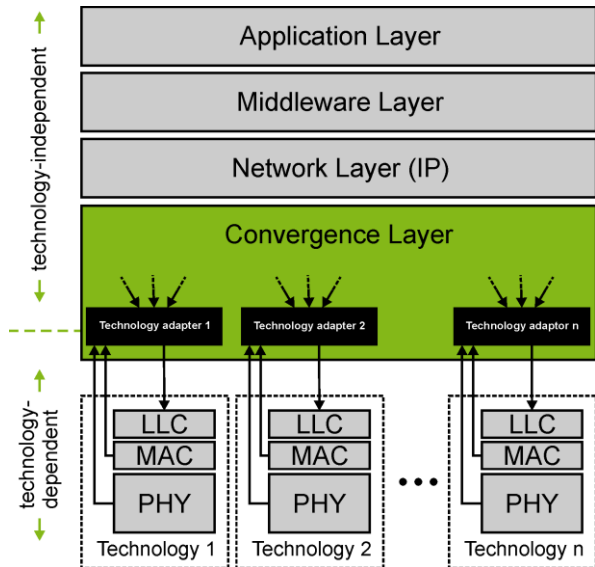


**Bild 4** Architektur einer integrierten Heimnetzwerk-Infrastruktur [4]

Im Bild 4 könnte z.B. das linke hLAN-Gerät seine WLAN Schnittstelle dauerhaft ausschalten, weil diese nicht benötigt wird. Gerade Netzwerkinfrastrukturgeräte, die typischerweise durchgehend aktiv sind, aber nur wenige Stunden am Tag tatsächlich benötigt werden, besitzen ein erhebliches Energieeinsparpotenzial. Über ein energiesparendes, dediziertes Signalisierungsnetzwerk können diese Geräte in verschieden ausgeprägte Schlafmodi versetzt werden, und sie können sich untereinander oder mit Endgeräten über notwendige Aktivierungen und Deaktivierungen von Netzwerkschnittstellen verständigen. Dies kann geschehen, ohne dass hLAN Schnittstellen mit hohem Energieverbrauch aktiv sind.

### 2.3. InterMAC

Die im Folgenden vorgestellten Verfahren zur Energieeinsparung in einem hybriden Netzwerk greifen auf ein technologieübergreifendes Netzwerkmanagement zurück. Dieses sollte eine Pfadsuche im heterogenen Netzwerk bereitstellen, relevante Informationen über die Linkauslastung liefern und Applikationsstreams im Netzwerk identifizieren. Die InterMAC Abstraktionsschicht unterhalb von IP bietet diese Funktionalität [1], [2], [7]. Das InterMAC Konzept ist in Bild 5 dargestellt. Mittels InterMAC-Adapter werden technologieabhängige Parameter in technologieunabhängige überführt. Aufgabe der InterMAC Konvergenzschicht ist es, die besten Pfade durch das Netzwerk basierend auf einer übergreifenden Metrik zu suchen. Außerdem müssen die QoS-Anforderungen (Quality of Service Anforderungen) einzelner Ströme im Netzwerk identifiziert und deren Einhaltung überwacht werden. Darüber hinaus gilt es, das Netzwerk zu überwachen und notwendige Informationen zu sammeln. Langfristige Beobachtungen können einem übergeordneten und eventuell zentralisierten Management zugeführt werden, welches bei Bedarf interveniert. Die zeitkritische Grundfunktion des InterMACs ist im Wesentlichen die Weiterleitung von MAC-Paketen, sodass diese zuverlässig und effizient über mehrere Technologien und Knoten hinweg ihr Ziel erreichen.



**Bild 5** InterMAC Konzept [1]

## 3. Verfahren zur Energieeinsparung

Zunehmend wird der Energieverbrauch, der durch die Kommunikationsinfrastruktur entsteht, bei der Entwicklung neuer Technologien berücksichtigt. Die separierte Verbesserung des Energieverbrauchs einzelner Technologien, die wir als Conventional Energy Saving (CES) bezeichnen, stößt naturgemäß jedoch schnell an Grenzen. So verwendet z.B. IEEE 802.3az einen optionalen Low Power Modus, der aktiviert wird, wenn der Link wenig benutzt wird. Dann werden periodisch Nachrichten ausgetauscht, um den Link aufrecht zu erhalten und es wird darauf gewartet, dass der Link vom Sender reaktiviert wird. Auch im Low Power Modus wird Energie verbraucht, schließlich muss eine Kommunikationsmöglichkeit aufrecht erhalten werden, damit der Link bei Bedarf wieder hochgefahren werden kann. Die Betrachtung des netzwerkweiten Energieverbrauchs unter Verwendung von technologieübergreifenden Informationen verspricht verglichen mit den Methoden des CES erhebliche Vorteile. So können z.B. WLAN-Schnittstellen bei bestehenden verkabelten Verbindungen gänzlich abgeschaltet werden. Dies setzt aber voraus, dass eine übergreifende Organisation über verschiedene Technologien hinweg in der Lage ist bei Bedarf Verbindungen wieder zu reaktivieren.

Grundprinzip beider hier vorgestellten Verfahren ist die Abschaltung nicht genutzter Schnittstellen. Eine Schnittstelle gilt als ungenutzt, wenn für die Zeitdauer eines Power Save Intervalls (PSI) keine Datenpakete gesendet oder empfangen wurden. Das PSI kann mit den Kommunikationspartnern ausgehandelt werden. Eine Schnittstelle muss immer dann aktiviert werden, wenn neue Routen gefunden werden müssen, wenn eine bekannte Route wieder genutzt wird oder wenn Broadcast Daten im Netzwerk verteilt werden und die Schnittstelle die beste Verbindung zu dem Zielknoten darstellt.

### 3.1. Aggregated Conventional Energy Saving

Aggregated Conventional Energy Saving (ACES) bezeichnet ein Verfahren, das ohne ein dediziertes Signalisierungsnetzwerk operiert. Jedoch werden technologieübergreifende Informationen genutzt, die dem intelligenten hLAN zur Verfügung stehen. Vor der Abschaltung einer Schnittstelle wird mit den Kommunikationspartnern das Connection Check Intervall (CCI), das Powersave Intervall (PSI) und das Hello Interval (HI) vereinbart. Das HI ist der Abstand, in dem im aktivierten Zustand sogenannte Probe Frames gesendet werden, die den nächsten Nachbarn das Vorhandensein eines hLAN-fähigen Netzwerkgeräts anzeigen. Eine inaktive Schnittstelle wird nach Ablauf des PSI abgeschaltet. Sobald eine Schnittstelle abgeschaltet wurde, beginnt das Connection Check Intervall (CCI). Nach dessen Ablauf muss die Schnittstelle mindestens für die Zeitdauer eines Connection Interrupted Timeout (CIT) aktiviert bleiben. In dieser Zeit können Probe Frames empfangen werden, die den Link aufrechterhalten oder Aktivierungspakete, die zu einer dauerhaften Aktivierung des Links führen. Ein Routenaufbau über eine Schnittstelle, die sich im Schlafmodus befindet, kann unter Umständen also relativ lange dauern. Es muss auf den Ablauf des CCI gewartet werden, bevor Frames geschickt werden können. Durch die Festlegung des CCI wird also immer ein Tradeoff zwischen Energieeinsparung und QoS vorgenommen.

### 3.2. Signaling Network Energy Saving

Signaling Network Energy Saving (SNES) nutzt ein niederrates Signalisierungsnetzwerk (SN). Eine HAN-Schnittstelle benötigt nur wenig Energie verglichen mit einer hLAN-Schnittstelle, sodass diese durchgehend aktiviert bleiben kann. Darüber hinaus können alle hLAN-Geräte sich direkt über das SN erreichen. Es besteht also zu jeder Zeit zu jedem Gerät eine direkte Kommunikationsmöglichkeit. Diese kann zur Deaktivierung und zur Aktivierung der Schnittstellen genutzt werden. Da jeder Knoten die Schnittstelle nach dem PSI abschaltet, wird das SN insbesondere genutzt, um Schnittstellen von Nachbarknoten für die eigenen Zwecke gezielt zu aktivieren. Verglichen mit dem ACES kann das periodische Aufwachen also wesentlich seltener geschehen, da eine Reaktion auf Änderungen mit Hilfe des SN immer möglich ist. Sobald eine neue Route im Netzwerk gesucht wird, können alle Knoten über das SN aufgefordert werden, die Interfaces zu aktivieren. Das zu sendende Paket wird dabei um die Zeitspanne eines Powersave Delay (PSD) verzögert. Dies gibt den unteren Schichten ausreichend Zeit die Verbindung wiederherzustellen. Grundsätzliche Unterschiede liegen also auf der Hand: Beim ACES werden hLAN Schnittstellen regelmäßig im Abstand des CCI angeschaltet und der Routenaufbau kann relativ lange dauern, da gerade bei Multihop Routen mehrfach auf das Ablaufen des CCI gewartet werden muss. Beim SNES können benötigte hLAN-Schnittstellen wesentlich länger deaktiviert bleiben, da notwendige Steuerinformationen immer über das SN ausgetauscht werden können.

**Tabelle 1** Parameter der Simulation

Parameter	ETH	PLC	WLAN	SN
Datenrate [Mbit/s]	100	80	50	0,25
PER	$10^{-7}$	$10^{-5}$	$10^{-3}$	-
<b>Leistungsaufnahmen [mW]</b>				
SLEEP	75	75	75	0,0006
IDLE	200	200	1340	14,1
RX	700	700	1410	27,6
TX	700	700	1500	135
<b>Zeitintervalle [ms]</b>				
HI	100	100	200	-
CIT	200	200	400	-
<b>Technologieunabhängige Zeitintervalle [ms]</b>				
CCI	2500	PSI	1000	
RQI	1000	PSD	10	
RNI	2000	RRI	3600000	
RRT	10	FRI	100	

## 4. Evaluation

### 4.1. Simulationsumgebung

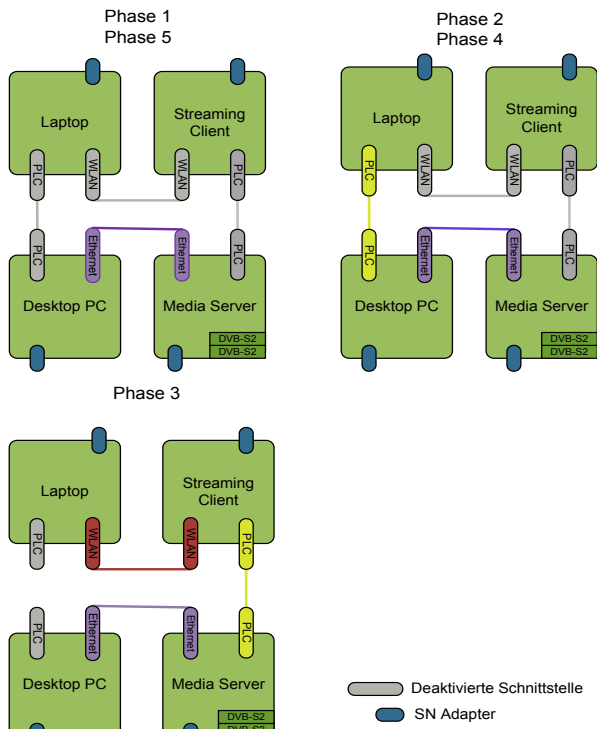
Zur Evaluierung der beschriebenen Algorithmen wurden Simulationen mit dem Netzwerksimulator OMNeT++ in Kombination mit dem INET Framework durchgeführt. Ein Modul unterhalb der IP Schicht, aber oberhalb der verschiedenen Technologien bildet die Funktionalität des InterMACs nach. Das InterMAC Modul operiert transparent für höhere Schichten, sodass Protokolle und Applikationen ohne Änderung verwendet werden können.

Die genutzten Übertragungstechnologien sind stark abstrahiert und werden im Wesentlichen durch Datenrate und Paketfehlerrate (PER) beschrieben. Die Leistungsaufnahme eines Interfaces wird mit Hilfe eines Energiezustandsmodells ermittelt. Die Parameter der verschiedenen Technologien und die verwendeten Längen der Zeitintervalle sind in Tabelle 1 aufgelistet.

### 4.2. Routing

Zur Routenfindung auf InterMAC-Ebene wird ein hybrides Verfahren verwendet, das proaktiv direkte Nachbarn mit InterMAC Unterstützung erkennt, indem Probe Frames im Abstand des Hello Intervals (HI) gesendet werden. Der Routenaufbau selbst erfolgt reaktiv. Sobald eine neue Route aufgebaut werden muss, wird ein Route Request Paket im Netzwerk per Broadcast verteilt. Erreicht dieses den Zielknoten, wird es mit einem Route Reply Paket beantwortet. Das Route Reply Paket trägt eine Flow-Identifikationsnummer und eine Routing-Metrik, die bei jedem Hop aktualisiert wird.

Dabei werden nur Route Reply Pakete mit der besten Metrik weitergeleitet. Den Startknoten des Routings erreicht eine Vorauswahl der bestmöglichen Routen, von denen er die beste auswählt und durch Senden eines Datenpakets



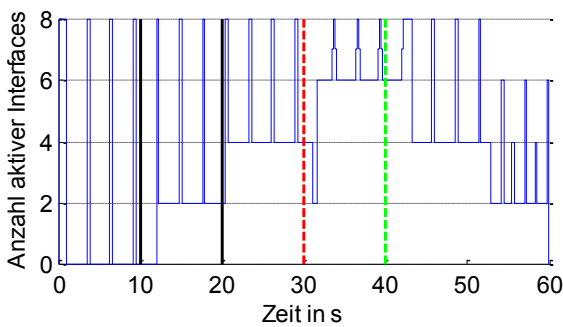
**Bild 6** Ablauf des Beispielszenarios

aktiviert. Zur Bewertung der Routen können verschiedene Metriken verwendet werden. Wird ein Route Request Paket nicht innerhalb des Route Request Timeouts (RRT) beantwortet, gilt der Zielknoten als unerreichbar. Ein erneuter Routenaufbau zu diesem Knoten darf erst nach Ablauf eines Route Request Intervalls (RQI) versucht werden. Eine bereits aufgebaute Route wird jeweils nach Ablauf eines Route Renew Intervalls (RNI) aktualisiert, indem eine erneute Pfadwahl

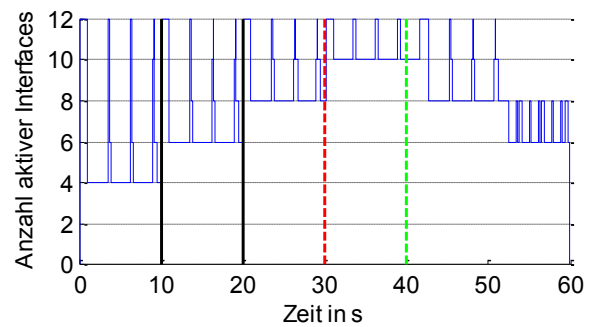
stattfindet. Bereits aktivierte Routen dürfen bei Nichtbenutzung erst nach Ablauf eines Route Retain Intervalls (RRI) gelöscht werden, während nicht aktivierte Knoten ihre Routeneinträge bereits nach Ablauf eines Flow Retain Intervalls (FRI) löschen dürfen.

### 4.3. Beispielszenario

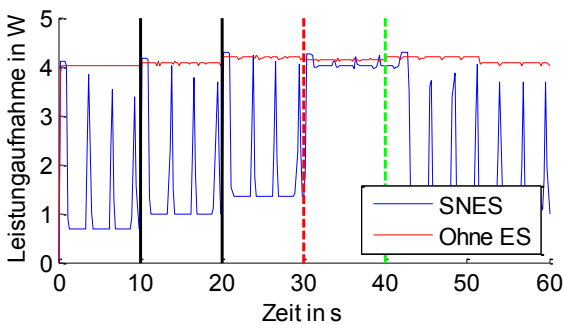
Das in Bild 6 dargestellte Heimnetzwerk-Szenario wurde simuliert. Es befinden sich vier Netzwerkknoten im Netzwerk. Ein Media Server kann UDP/IP Streams (z.B. DVB-S2) im Netzwerk verteilen. In Phase 1, die nach 10 Sekunden startet, empfängt der Desktop PC einen Video Stream mit ca. 5 Mbit/s und einer Paketgröße auf Applikationsebene von 1472 Byte über eine direkte Ethernet-Verbindung vom Server. In dieser Phase können im Prinzip alle anderen Netzwerkknoten ihre Schnittstellen ausschalten, da diese nicht benötigt werden (grau). Phase 2 startet nach 20 Sekunden. Der Laptop empfängt einen DVB-S2 Stream ebenfalls mit ca. 5 Mbit/s. Dieser muss über einen Hop (Desktop PC) über PLC und Ethernet übermittelt werden. In dieser Phase kann der Streaming Client alle Schnittstellen, der Laptop seine WLAN-Schnittstelle und der Server seine PLC Schnittstelle deaktivieren. In Phase 3 (30 Sekunden) wird der Laptop von der Docking Station entfernt, sodass die PLC Verbindung abreißt. Das Routing bemerkt den Abriss nach zwei ausbleibenden Probe Frames und baut eine neue Route über den Streaming Client auf, der in diesem Moment aktiv werden muss. Die WLAN Verbindung wird nun genutzt (rot), gleichzeitig kann die PLC-Verbindung des Desktop PCs deaktiviert werden. In Phase 4 befindet sich der Laptop wieder in der Docking-Station. Die Pfadsuche erkennt nach einer gewissen Zeit die neue Verbindung, und es findet ein Rerouting auf die bessere Verbindung statt. In Phase 5 wird der Stream vom Nutzer abgebrochen, und es



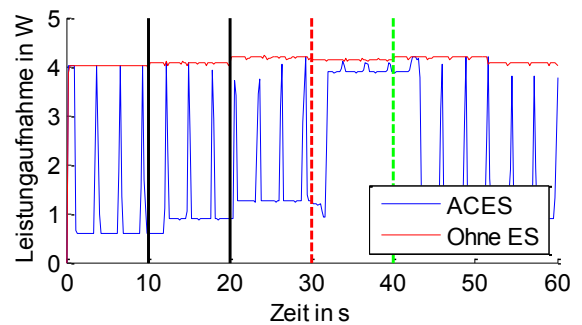
**Bild 7** Aktive Interfaces mit ACES



**Bild 8** Aktive Interfaces mit SNES



**Bild 9** Leistungsaufnahme mit ACES



**Bild 10** Leistungsaufnahme mit SNES

wird wieder in Phase 1 übergegangen. In Bild 7 und Bild 8 ist die Anzahl der aktivierten Schnittstellen mit ACES und SNES über der Zeit aufgetragen. Ohne Energieeffizienzerweiterung wären über die gesamte Zeitdauer acht Schnittstellen aktiv. Beim SNES Verfahren sind durchgehend vier Schnittstellen zum SN aktiv. Die Anzahl aktivierter hochratiger Verbindungen ergibt sich aus der Betrachtung der Datenströme im Netzwerk. Mit den in Tabelle 1 gegebenen Werten und den durch die Simulation gewonnenen RX-, TX-, Idle- und Sleep-Zeiten lässt sich der Energieverbrauch berechnen. Bild 9 und Bild 10 zeigen die Leistungsaufnahme gemittelt über 0.5 Sekunden. Im aktiven Zustand setzt sich der Leistungsbedarf der Schnittstelle aus den Zeiten im RX, TX und Idle Modus zusammen. Erkennbar ist, dass das SNES Verfahren über eine konstant leicht erhöhte Leistungsaufnahme verfügt. Dies liegt an den Schnittstellen zum SN. Darüber hinaus wird aus Bild 7 der Nachteil des ACES Verfahrens deutlich. Nach 30 Sekunden reißt die PLC Verbindung ab. Nun muss bis zum Ablauf des CCI gewartet werden, bis der WLAN Link aktiviert werden kann. Es kommt zum Einbruch der Datenrate und zum Verlust von Datenpaketen. Erkennbar ist dies an dem leichten Einbruch der Leistungsaufnahme. Hier schaltet sich das PLC Interface aus, während das WLAN Interface noch nicht aktiviert werden konnte. Erst nach ca. 2 Sekunden können die Applikationsdaten wieder übermittelt werden. Im Falle eines TCP/IP Stroms, würde dies vermutlich zum Abriss der Verbindung führen. Auch beim Verbindungsaufbau in Phase 1 kommt es zu erheblichen Verzögerungen. Diese Einschränkungen der QoS sind nicht hinnehmbar.

#### 4.4. Langfristiges Einsparpotenzial

Eine beispielhafte Nutzung des Heimnetzwerks an einem Tag könnte so aussehen, dass das Netzwerk 22 Stunden ungenutzt ist und nur an 2 Stunden in ähnlicher Weise wie oben beschrieben Anwendung erfährt. Eine Phase wie in dem Beispielszenario dauert dann ca. 25 Minuten. Damit lässt sich der Energieverbrauch der Netzwerkschnittstellen an einem Tag leicht bestimmen. Ohne Energieeffizienzerweiterung werden ca. 96 Wh verbraucht. Wenn ein SN zur Verfügung steht, können hochratige Schnittstellen ausgeschaltet werden. Es werden mit dem SNES Verfahren ca. 20 Wh an Leistung aufgenommen. Es wäre also eine Einsparung von ca. 79 % zu erzielen. In einem Jahr könnten in einem Haushalt also ca. 28 kWh eingespart werden. Die absoluten Werte würden sich bei der Berücksichtigung der Abschaltung nicht verwendeter Host-Geräte, die typischerweise ein Vielfaches an Energie benötigen, natürlich noch beträchtlich erhöhen.

#### 4.5. Diskussion

Die Reaktionszeit auf Veränderungen der Netzwerkinfrastruktur hängt beim ACES Verfahren maßgeblich vom CCI ab. Das SNES Verfahren kann unabhängig davon reagieren, denn das SN bietet zu jeder Zeit eine Kommunikationsmöglichkeit. Um QoS-Einschränkungen zu verhindern, müsste das ACES Verfahren also mit CCI-Dauern von weit unter einer Sekunde arbeiten. Dies erscheint je-

doch unrealistisch, da der Verbindungsaufbau mit sämtlichen Abläufen, wie z.B. Authentifizierung, gewisse Zeit benötigt. Daher sind Einsparungen in dieser Größenordnung und ohne Modifikation der Technologien nur unter Verwendung des dedizierten SN möglich. Das SNES Verfahren zeigt in dem untersuchten Beispielszenario gute Reaktionszeiten auf Veränderungen im Netzwerk und kann den Energieverbrauch der Netzwerkschnittstellen erheblich senken. Der Energieverbrauch der niederratigen Schnittstellen ist zu vernachlässigen, zumal diese in Zukunft für Heimautomatisierungsaufgaben ohnehin benötigt werden.

### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass unter Verwendung eines niederratigen Netzwerks für Netzwerkmanagementaufgaben der Energieverbrauch einer hybriden Heimnetzwerkinfrastruktur ohne Einschränkung der QoS erheblich gesenkt werden kann. Ein Vergleichsverfahren, das ohne ein Signalisierungsnetzwerk auskommt, kann die QoS-Anforderungen nicht erfüllen. Zukünftig gilt es die vorgestellten Konzepte praktisch umzusetzen und deren Verwendbarkeit in realen Systemen zu überprüfen. Insbesondere die sinnvolle Dimensionierung der zeitlichen Parameter der Verfahren ist eine Herausforderung, da Technologien unterschiedlich lange für einen Verbindungsaufbau benötigen. Auch die Interaktion mit höheren Schichten und unterschiedlichen Applikationen gilt es zu untersuchen.

### 6. Literatur

- [1] S. Nowak et al., Towards a convergent digital home network infrastructure, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Nov. 2011
- [2] M. Brzozowski, S. Nowak, F.-M. Schaefer, R. Jensen, and A. Palo, Inter-MAC – from vision to demonstration: enabling heterogeneous meshed home area networks, 14th ITG Conference on Electronic Media Technology, Dortmund, March 2011.
- [3] D. Culler et al., Towards a sensor network architecture: lowering the waistline, 10th conference on Hot Topics in Operating Systems, vol. 10, pp.24, 2005
- [4] F.-M. Schaefer, R. Kays, Architektur einer vollintegrierten Heimnetzwerkinfrastruktur für das Smart Home, VDE Kongress 2012, Nov. 2012
- [5] H. Dai, R. Han, Unifying micro sensor networks with the Internet via overlay networking, 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, 2004, pp. 571- 572, 16-18 Nov. 2004
- [6] IETF RFC 4919, 6LoWPAN: Overview, Assumptions, Problem Statement and Goals
- [7] J.-P. Javaudin, M. Bellec, P. Jaffrè, A. Foglar, O. Hoffmann, and O. Isson, Inter-MAC concept for gigabit home networks, IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, IEEE PIMRC'09, Tokyo, Sept. 2009.
- [8] V. Suraci, A. Palo, Green networking: Integration of wireless sensor network with home gigabit access, Future Network & Mobile Summit, Jun. 2011