

Rekbare en wasbare elektronica voor textielintegratie

Stretchable and Washable Electronics for Embedding in Textiles

Thomas Vervust

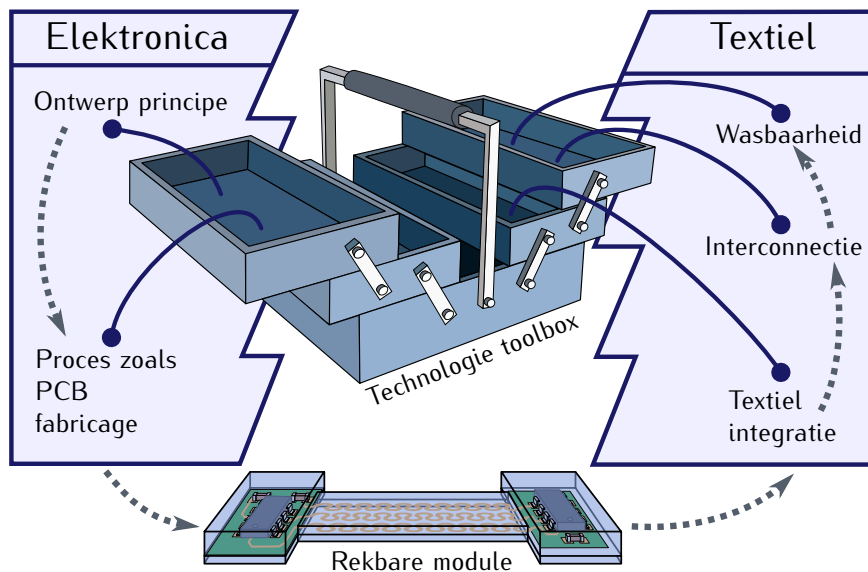
Promotor: prof. dr. ir. J. Vanfleteren
Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van
Doctor in de Ingenieurswetenschappen: Elektrotechniek

Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen
Voorzitter: prof. dr. ir. J. Van Campenhout
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2012 - 2013



Nederlandse samenvatting –Summary in Dutch–

Zoals toegelicht in **Hoofdstuk 1**, is de belangrijkste doelstelling van dit proefschrift het overwinnen van een aantal problemen die geconstateerd werden in de huidige inspanningen om textiel geïntegreerde elektronica te creëren. Daarom worden bestaande en nieuwe technologieën gebruikt en verder ontwikkeld die het mogelijk maken om textiel geïntegreerde elektronica te realiseren op zo'n manier dat de flexibele/rekbare aard van typische textielproducten behouden blijft. Om de kloof tussen de elektronica en textielindustrie te dichten wordt het concept van een technologie toolbox geïntroduceerd.



De onderwerpen rond de toolbox geven enkele van de belangrijkste aspecten tijdens het complete productieproces weer, gaande van ontwerp tot realisatie en testen. Dezelfde logische volgorde wordt bewaard in de inhoud van dit proefschrift.

In **hoofdstuk 2** blijven we binnen de wereld van de elektronica. In het eerste deel van het hoofdstuk wordt het ontwerpprincipe van een rekbaar circuit

uitgelegd. Om rekbaarheid te verkrijgen, wordt de schakeling onderverdeeld in verschillende niet-rekbare functionele eilanden die verbonden zijn met rekbare verbindingen (meanders). Dit rekbare circuit wordt geëncapsuleerd in een elastomeer, wat resulteert in een rekbare module die in textiel kan worden geïntegreerd. Het ontwerp van een textielproduct, met uittrekbare elektronische modules, vereist het denken over bepaalde onderwerpen en een goede planning vanaf het begin. Een eenvoudig dertien stappen implementatieproces wordt voorgesteld, dat gebruikt kan worden om geleidelijk aan tot een goed ontworpen demonstrator of product te komen. Ook een meander ontwerptool voor de EAGLE PCB-software wordt gepresenteerd. Deze tool werd ontwikkeld om de routing van de meanderende rekbare verbindingen te vereenvoudigen.

De volgende twee delen van het hoofdstuk behandelen het productieproces van de uittrekbare modules. Deze productie wordt onderverdeeld in een substraatfabricagedeel en een encapsulatiedeel. De ontwikkelde substraat fabricage methode vertrekt van een standaard flexibele printplaat en maakt gebruik van lasersnijden om de rekbare meanders en de functionele eilanden te structureren. Na de substraatfabricage, wordt de ontwikkeling van twee encapsulatiemethodes beschreven: encapsulatie door spuitgieten en door lamineren. Thermohardende PDMS materialen werden gebruikt voor het spuitgieten en thermoplastisch PU in het geval van laminatie. Naast de encapsulatiemethodes wordt ook het belang van openingen in de encapsulatie aangehaald. Dit om het ademend vermogen van de module te verbeteren en om toegang tot contactvlakken te verkrijgen.

Het laatste onderwerp van het hoofdstuk beschrijft de hechting tussen het rekbare circuit en de encapsulatie. Een goede hechting is belangrijk om delaminatie van de encapsulatie tijdens de levensduur van het product te voorkomen.

In **Hoofdstuk 3** komen we terecht in de textielwereld en bespreken we hoe de uittrekbare elektronische modules geïntegreerd kunnen worden in textiel. Om de industrialisatie van de processen te vergemakkelijken, werden integratiemethoden ontwikkeld die makkelijk over te nemen zijn in textielproductie. De twee verschillende encapsulatie materiaal types (thermohardend en thermoplastisch) hebben geleid tot twee verschillende integratiemethoden. De eerste methode maakt gebruik van een gezeefdrukte PDMS lijmlaag om PDMS geëncapsuleerde rekbare modules en stoffen te verlijmen. Er wordt aandacht besteed aan de penetratiediepte van de gedrukte laag. Door de penetratie in de stof zo veel mogelijk te beperken, werd de rekbaarheid van de stof zo goed mogelijk bewaard. De tweede methode maakt gebruik van een laminatiestap om een TPU geëncapsuleerde rekbare module te hechten aan een stof.

Enmaal de module aan de stof gehecht is, moet deze vast blijven zitten tijdens de levenscyclus. Daarom moet de lijmlaag tussen de stof en de rekbare module betrouwbaar genoeg zijn om fysische vervormingen tijdens gebruik en reiniging te overleven. De hechting tussen Sylgard 186 (PDMS) of PE

Krystalflex 429 (TPU) geëncapsuleerde modules en stoffen bleek voldoende te zijn. Stoffen met dummy geëncapsuleerde modules werden tot 50 keer gewassen zonder delaminatie te vertonen.

Met de nadruk op draagbaarheid, tonen we aan dat de bereikte realisaties van textiel geïntegreerde rekbare elektronica het heel goed doen. Technologische ontwikkelingen hebben geleid tot lichte, rekbare modules die gebruikt kunnen worden in kledij, zonder afbreuk te doen aan het gebruikscomfort. De verandering in rekbaarheid die ze veroorzaken, zijn van dezelfde orde als deze van typische kleurenprints in hedendaagse textielproducten.

Het is mogelijk dat toepassingen vereisen dat verschillende rekbare modules geïntegreerd worden in textiel. Dit is het onderwerp van **Hoofdstuk 4**, waar we kijken naar de interconnectie van rekbare modules. De stroomdistributie is waarschijnlijk de meest voorkomende reden voor het verbinden van een rekbare module. Andere redenen zijn de signaaloverdracht tussen de verschillende modules en de interconnectie van modules met geleidende textiel-elementen (bv. textiel sensor, textiel antenne). In alle gevallen zorgt de interconnectie voor een elektrisch pad tussen verschillende elektrische elementen. Daarom zijn de elektrische eigenschappen van de interconnectie van groot belang. Enkele belangrijke parameters bij de bepaling van de interconnectievereisten worden aan het begin van het hoofdstuk gegeven.

Het aantal verschillende textielgebaseerde interconnectiemethoden die bestaan of die op dit moment het onderwerp van onderzoek zijn, is groot. Om een beter overzicht te krijgen, worden ze ingedeeld naar het niveau waarop ze geïntroduceerd worden tijdens de textiel productie: via het intrinsieke textiel productieproces, via het textielveredelingsproces, via het textiel confectieproces. Voor elk van deze categorieën worden verschillende voorbeelden gegeven en van commentaar voorzien.

Tenslotte wordt de verbinding van rekbare modules met een bepaalde textielgebaseerde interconnectiemethode besproken. Een rekbare module bestaat uit een volledig afgesloten encapsulatie. Daarom is er een manier nodig om toegang te krijgen tot contactvlakken in de module. De eerste manier is de creatie van een opening in de encapsulatie om contact te maken met een contactvlak in de module. In een tweede manier om een contact te voorzien, steken de contacten uit module. Verschillende uitvoeringen van sommige voorgestelde connectie mogelijkheden worden getoond.

In de eerste hoofdstukken wordt uitgelegd hoe rekbare modules ontworpen kunnen worden, geproduceerd, geïntegreerd in textiel en indien nodig geïnterconnecteerd met andere textiel geïntegreerde modules. Afhankelijk van de uiteindelijke toepassing is het mogelijk dat het textielproduct gereinigd moet worden tijdens zijn levenscyclus. Daarom onderzoekt **Hoofdstuk 5** de wasbaarheid van textiel geïntegreerde rekbare modules. In het algemeen kan gesteld worden dat er twee grote uitdagingen zijn om wasbaarheid van rekbare elektronica te verkrijgen: voldoende waterbestendigheid en een goede

mechanische betrouwbaarheid. In dit doctoraat lag de focus op water gebaseerde reiniging. Voor watergebaseerde reiniging werd de ISO 6330:2000 norm geselecteerd omdat deze representatief is voor huishoudelijke wasomstandigheden.

Het eerste gedeelte van het hoofdstuk behandelt de waterdichtheid van de modules. Tijdens het reinigen, worden de elektronische modules ondergedompeld in een warm water/zeep mengsel. De encapsulatie moet de elektronica beschermen van dit mengsel om kortsluitingen en een elektrisch falen van het apparaat te voorkomen. De Water Effect Test (WET) werd ontworpen om de waterbestendigheid van rekbare modules te evalueren en is gebaseerd op lekstroommetingen tussen geëncapsuleerde koperbanen tijdens de onderdompeling. Zes verschillende WET-staaltypes werden getest: zonder encapsulatie, met PDMS en met TPU encapsulatie, en dezelfde, maar met een extra soldeermasker. Uit testen blijkt dat alle encapsulatie types het potentieel van een goede encapsulatie hebben, met betrekking tot waterbestendigheid. In alle gevallen waren de lekstromen aanzienlijk lager in vergelijking met het referentiestaal zonder encapsulatie. De beste resultaten werden verkregen met de PDMS en TPU encapsulatie in combinatie met het soldeermasker. In beide gevallen bleven de lekstromen stabiel rond de $10^{-9}A$. Dit bewijst een goede waterbestendigheid tijdens de onderdompeling in water, gemeten tot 55 uur.

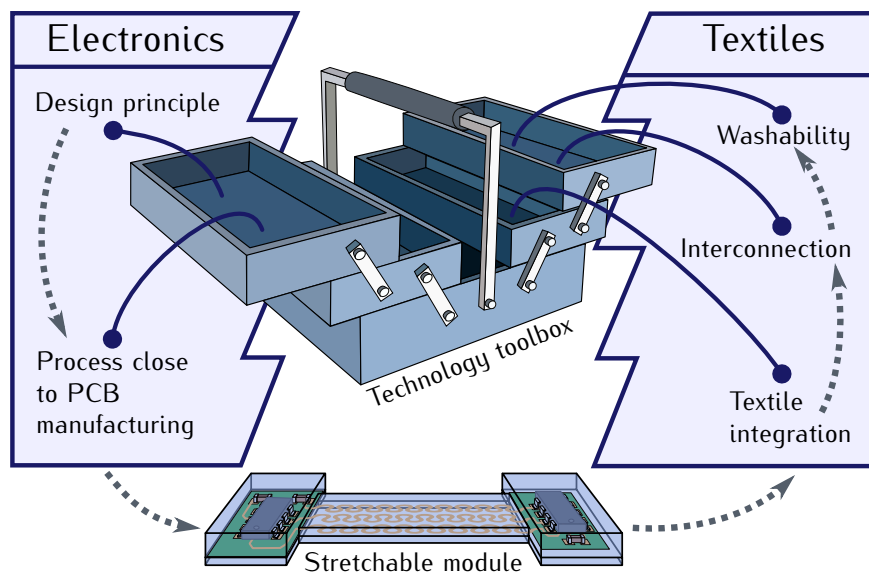
Naast waterbestendig, moeten de modules robuust genoeg zijn om het mechanische 'misbruik' die ze ondervinden tijdens typische textiel reinigingsprocessen te overleven. Deze wasbetrouwbaarheid is het onderwerp van het tweede gedeelte van het hoofdstuk. Ten eerste wordt de betrouwbaarheid van textielgeïntegreerde knipperende LED-modules geëvalueerd. Elke knipperende LED-module bevat een flexibel eiland met vier LEDs die per twee afwisselend knipperen. Deze modules waren oorspronkelijk bedoeld om de interconnectie van verschillende PDMS geëncapsuleerde modules met een textielgeïntegreerde elektrische draad te illustreren. In een later stadium werden deze knipperende LED-modules ook gebruikt om een eerste aantal wasproeven uit te voeren. Op alle teststalen werd het defect na wassen gevonden aan de interconnectie tussen de knipperende LED-module en de elektrische draad voor het voeden van de modules, terwijl de modules zelf nog steeds functioneel waren. Na de evaluatie van deze verkennende wastesten werd het duidelijk dat er meer specifieke testen nodig waren. De ontwikkelde wasbetrouwbaarheidstest (WR-test) evalueert de soldeercontacten van SMD-componenten op een flexibel eiland, waarbij een geëncapsuleerde module meerdere malen gewassen wordt in een standaard wasmachine. Een WR-test module bevat 50 SMD weerstanden (0402 en 0603 behuizingen) en vier dummy IC's (TSSOP28 en QFN32 behuizingen). Er zijn in totaal 220 contacten die kunnen breken tijdens het wassen. Deze contacten zijn ingedeeld in ketens, wat resulteert in 42 meetpunten bij elke module. Twee verschillende ontwerpen voor de WR-test modules werden gebruikt tijdens de tests. Het doel van de WR2-test was het verbeteren van het WR1 ontwerp. Wijzigingen werden aangebracht

in de 0402 en 0603 contactvlak lay-out en FR4 plaatjes werden gebruikt om de TSSOP-en QFN contacten te versterken. De WR-test modules werden gehecht aan een gebreide of geweven stof om een verschil te maken tussen rekbaar (gebreide) en stijve (geweven) stoffen. Er wordt geconcludeerd dat het WR2 ontwerp een grote verbetering is ten opzichte van het WR1 ontwerp. In het geval van het WR1 ontwerp breken het grootste deel van de soldeer contacten na één wascyclus. Uit testen met het WR2 ontwerp bleek dat de WR2-modules die geplaatst werden op een breisel het best presteerden. Er werden geen defecten geïntroduceerd tijdens de 25 wascycli die uitgevoerd werden gedurende de test. Het verlies in geleidbaarheid in enkele van de ketens van de WR2-modules op geweven stoffen werd in verband gebracht met vouwlijnen en scheuren in de flexibele printplaat en waren niet het gevolg van gebroken connecties. Er wordt uitgelegd dat deze defecten ontstaan door spanningen in de module wanneer deze naar binnen gebogen wordt.

Tenslotte worden in **Hoofdstuk 6** verschillende demonstratoren voorgesteld die ontworpen en gerealiseerd werden om het gebruik van de ontwikkelde rekbaar elektronica technologie voor textiel integratie te illustreren. Deze succesvolle realisaties zijn: een rekbaar LED-array, een 7x8 LED-display, knipperende LED-modules, een RGB-kleurenscherm, een feest T-shirt en een draadloze oplader. Deze demonstratoren kunnen beschouwd worden als bouwstenen, die mogelijk kunnen leiden tot een aantal eerste echte toepassingen in de toekomst ...

English summary

As explained in **Chapter 1**, the main objective of this PhD thesis is to overcome some of the difficulties observed in today's efforts to create textile integrated electronics. Therefore existing and new technologies are used and further developed to obtain textile integrated electronics in such a way that the typical flexible/stretchable nature of textile products are preserved. In order to bridge the gap between the electronic and textile industries, the concept of a technology toolbox was created.



The topics surrounding the toolbox reflect some of the key aspects during the complete manufacturing process, going from design to realization and testing. This same logical order is preserved in the contents of this dissertation.

In **Chapter 2** we stay within the world of electronics. In the first part of the chapter, the design principle of a stretchable circuit is explained. To obtain stretchability, the circuit is subdivided in several non-stretchable functional islands, which are interconnected with stretchable interconnections (meanders). This stretchable circuit is encapsulated in an elastomer, resulting in a stretchable module that can be integrated in textile. The design of a tex-

tile product, containing stretchable electronic modules, requires thinking on certain topics and a good planning from the start. A simple thirteen-step implementation process is proposed, which can be used to gradually come to a well designed demonstrator or product. Also a meander design tool for the EAGLE PCB software is presented. This tool was developed to simplify the routing of the meandering stretchable interconnections.

The next two parts of the chapter deal with the production process of the stretchable modules. This production is subdivided into a substrate fabrication part and an encapsulation part. The developed substrate fabrication method starts from a standard flexible circuit board and uses laser cutting to structure the stretchable meanders and the functional islands. Next to the substrate fabrication, the developments of two encapsulation methods are discussed; encapsulation by injection molding and by lamination. Thermosetting PDMS materials were used for the injection molding and thermoplastic PU in the case of lamination. Besides the encapsulation methods, also the importance of openings in the encapsulation for breathability and contact pad access is addressed.

The last topic of the chapter describes the adhesion between the stretchable circuit and the encapsulation. It is important to have a good adhesion to prevent delamination of the encapsulant during product life.

In **Chapter 3** we enter the world of textiles and we discuss how the stretchable electronic modules can be integrated into textiles. To facilitate industrialization of the processes, the target was to develop integration methods that are easy to adopt in textile manufacturing. The two different encapsulation material types (thermosetting and thermoplastic) have led to two different integration methods. The first method uses the screen printing of a PDMS glue layer to bond PDMS encapsulated stretchable modules and fabrics together. Attention is given to the penetration dept of the printed layer. By limiting the penetration into the fabric as much as possible, the stretchability of the fabric was preserved as well as possible. The second method uses a lamination step to bond a TPU encapsulated stretchable module to a fabric.

Once the module is attached to the fabric it should remain attached during the product life cycle. Therefore, the adhesive layer between the fabric and the stretchable module should be reliable enough to survive physical deformations during use and cleaning. The adhesion between Sylgard 186 (PDMS) or Krystalflex PE 429 (TPU) encapsulated modules and fabrics was found to be adequate. Fabrics containing dummy encapsulated modules were washed up to 50 times without showing delamination.

With a focus on wearability, we show that the achieved realizations of textile integrated stretchable electronics are doing very well. Technological developments have resulted in lightweight stretchable modules that can be used in clothing without compromising user comfort. The change in stretchability they cause, is in the same range of changes introduced by typical color prints in today's textile products.

It is possible that applications require different stretchable modules integrated into the textile. This is the topic of **Chapter 4** where we look at the interconnection of stretchable modules. Probably the most common reason for interconnecting a stretchable module is the power distribution. Other reasons include the signal transmission between different modules and the interconnection of modules with conductive textile elements (e.g. textile sensor, textile antenna). In all cases, the interconnection provides an electrical path between different electrical elements. Therefore, the electrical characteristics of the interconnection are of major importance. Some important parameters for the determination of the interconnection requirements are given at the beginning of the chapter.

The amount of different textile based interconnection methods that exist or are currently the topic of research is large. To get a better overview, they are categorized according to the level at which they are introduced during textile manufacturing: via the intrinsic textile manufacturing process, via the textile finishing process, via the textile confection process. For each of these categories, different examples are given and commented on.

Finally, the connection of stretchable modules with a certain textile based interconnection method is discussed. A stretchable module consists of an entirely enclosed encapsulation. Therefore, a way to access contact pads in the module is needed. The first way is to create an opening in the encapsulation in order to make contact with a contact pad. A second way to provide contact with the module is to let the contacts protrude out of the module. Different realizations of some of the proposed connection possibilities are presented.

The first chapters explain how stretchable modules can be designed, produced, integrated in textile and if required interconnected with other textile integrated modules. Dependent on the final application it might be possible that the textile product needs cleaning during its life cycle. Therefore, **Chapter 5** investigates the washability of textile integrated stretchable modules. In general, it can be stated that there are two major challenges to obtain washability for stretchable electronics: sufficient water resistance and good mechanical reliability. In this PhD the focus was on water-based cleaning. For water-based cleaning the ISO 6330:2000 standard was selected as it is representative for domestic washing conditions.

The first main part of the chapter discusses the water resistance of the modules. During cleaning, the modules are immersed in a hot water/soap mixture. The encapsulant should protect the electronics from this mixture to prevent short circuits and electrical failure of the device. The Water Effect Test (WET) was designed to evaluate the water resistance of stretchable modules and is based on leakage current measurements between encapsulated copper tracks during immersion. Six different WET-sample types were tested: without encapsulation, with PDMS and with TPU encapsulation, and the same but with an additional solder mask. The tests reveal that all encapsulation types have the potential of being a good encapsulant with respect to water resistance.

In all cases, the leakage currents were lowered significantly compared to the reference sample without encapsulation. Best results were obtained with the PDMS and TPU encapsulation in combination with the solder mask. In both cases, the leakage currents remained stable around 10^{-9} A. This proves good water resistance during water immersion, measured up to 55 hours.

Next to being water resistant, the modules should be robust enough to survive the mechanical 'abuse' they encounter during typical textile cleaning processes. This washing reliability is the topic of the second main part of the chapter. First, the washing reliability of textile integrated blinking LED modules is evaluated. Every LED module is a flexible island with four LEDs that are blinking two by two. These modules were originally designed to illustrate the concept of interconnecting different PDMS encapsulated modules with a textile integrated electric wire. In a later phase these blinking LED modules were also used to conduct a first number of washing tests. On all test samples the failure after washing was found at the interconnection between the module and the electric wire for powering the modules, while the modules itself were still functional. After the evaluation of these exploring washing tests, it became clear that more dedicated tests were needed. The developed washing reliability test (WR test) evaluates the solder contacts of SMD components on a flexible island when an encapsulated module is washed several times in a standard washing machine. One WR test sample contains 50 SMD resistors (0402 and 0603 packages) and four dummy IC's (TSSOP28 and QFN32 packages). In total there are 220 contacts that can cause failure during washing. These contacts were grouped together in daisy chains, resulting in 42 measurement pads on each sample. Two different WR designs were used in the tests. The purpose of the WR2 test was to improve the WR1 test design. Changes were made to the 0402 and 0603 pad layout and FR4 stiffeners were used to reinforce the TSSOP and QFN contacts. The WR test modules were attached to a knitted or woven fabric in order to make a difference between stretchable (knitted) and less stretchable (woven) fabrics. It is concluded that the WR2 design is a major improvement compared to the WR1 design. Most of the solder contacts in the WR1 design fail after one washing cycle. The tests with the WR2 design revealed that the WR2 modules on a knitted fabric are performing the best. No defects were introduced during the 25 washing cycles that were conducted during the test. Conductivity loss in some of the chains of the WR2 samples on woven fabrics were related to folds and cracks in the flexible board and not because of broken contacts. It is explained that these defects arise due to stresses in the module when it is bent inwards.

Finally, **Chapter 6** presents different demonstrators that were designed and realized to illustrate the use of the developed stretchable electronics technology for textile integration. These successful realizations include a stretchable LED array, a 7x8 LED display, blinking LED modules, an RGB color display, a party shirt and a wireless battery charger. These demonstrators can be considered as building blocks, possibly leading to some first real applications in the future...